

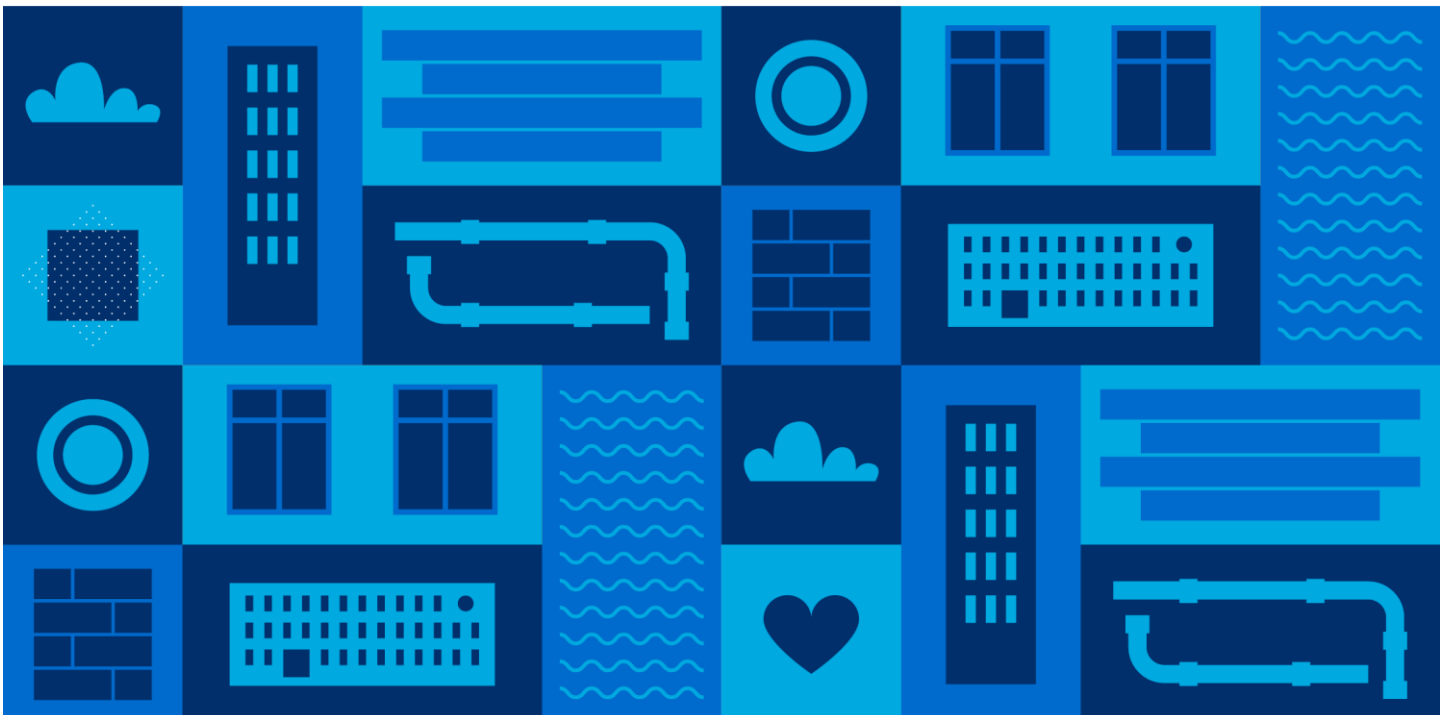


**TERVEET  
TILAT** 2028

# Rakennusfysiikkaa rakennusinsinööreille

## **Virtaukset**

Rafnet 2020 -oppimateriaalin teoriaosan osio V (Virtaukset)



Terveet tilat 2028 -ohjelma  
Ympäristöministeriö

# Rakennusfysiikkaa rakennusinsinöörille

## Virtaukset

### **Rafnet 2020 -oppimateriaalin teoriaosan osio V (Virtaukset)**

LAB-  
ammattikorkeakoulu

Oulun  
ammattikorkeakoulu

Lapin  
ammattikorkeakoulu

Karelia  
ammattikorkeakoulu

Kaakkois-Suomen  
ammattikorkeakoulu

Savonia  
ammattikorkeakoulu

Jyväskylän  
ammattikorkeakoulu

Hämeen  
ammattikorkeakoulu

## ALKUSANAT

Tämä oppimateriaali on osa RAFNET 2020 -projektin tuottamaa rakennusfysiikan oppimateriaalia, joka on suunnattu lähinnä ammattikorkeakoulujen rakennusinsinööriopiskelijoille ja jo alalla toimiville rakennusinsinööreille. Tavoitteena on antaa pohja rakenteiden rakennusfysikaaliseen suunnitteluun ja toimivaan rakenteiden toteutukseen. Oppimateriaalia voidaan käyttää soveltuvin osin myös rakennusmestari- ja rakennusarkkitehtikoulutuksen rakennusfysiikan opinnoissa.

RAFNET-oppimateriaali koostuu kirjallisesta teoriaosasta ja oheismateriaalista. Teoriaosa jakautuu viiteen osioon:

V	Virtaukset
L	Lämpö
K	Kosteus
S	Sisäilma
M	Mittaukset

Teoriaosan osioissa V, L ja K tarkastellaan rakennusfysiikan perusteorioita rakenteiden ja eri rakenneosien rakennusfysikaalisen toiminnan perusteita ja niihin liittyviä fysiikan perusilmiöitä lämpö- ja kosteusteknisen suunnittelun näkökulmasta. Apuna käytetään runsaasti kuvia ja laskentaesimerkkejä. Sisäilma-osiossa annetaan perustieto rakennuksen sisäilmaan vaikuttavista tekijöistä ja sisäilmaston laatu-kriteereistä. Mittausosiossa tarkastellaan lämpöön ja kosteuteen sekä ilmavirtauksiin liittyviä mittauksia. Oppimateriaalin sisältö ja vaatimustaso on suunniteltu vastaamaan vaativan luokan mukaista insinööripintojen rakennusfysiikan perusjakson vaatimuksia (5 op). Vaadittava kokonaisuus saavutetaan teoriaosaan ja siihen liittyvään oheismateriaaliin pohjautuvilla harjoitustehtävillä ja tätä oppimateriaalia täydentävillä oppimateriaaleilla, jotka käsittelevät rakenteiden lämpö- ja kosteusteknistä toimintaa, rakennusten kosteudenhallintaa hankkeen eri vaiheissa sekä äänitekniikan perusteita. Rakennusfysiikan opintojen osana on käsiteltävä myös

Ympäristöministeriön laatimat asetukset ja ohjeistukset, jotka liittyvät rakennusten energiatehokkuuteen, rakennusten kosteustekniseen toimivuuteen ja rakennusten ääniympäristöön.

RAFNET 2020 -materiaali on laadittu siten, että sitä voi käyttää myös verkkopohjaisten rakennusfysiikan kurssien ja opintojaksojen oppimateriaalina. Sitä voidaan soveltaa myös rakennusfysiikan täydennyskoulutuksessa. RAFNET-materiaali ei ole varsinainen suunnitteluohje eikä määräyskokoelma. Se pyrkii auttamaan opiskelijaa ymmärtämään rakennusfysiikkaa ja soveltamaan sitä rakennusfysikaalisessa suunnittelussa ja rakenteiden toteutuksessa hyödyntäen Suomessa käytössä olevia rakennusfysiikkaan liittyviä asetuksia ja ohjeita.

Tässä virtausosiossa tarkastellaan rakennuksissa esiintyviin virtauksiin liittyvät peruskäsitteet ja perusteoria. Laskentaesimerkeissä rajoitetaan pitkälti yksinkertaisiin käsin laskettaviin tehtäviin. Virtausosio keskittyy pääasiassa ilman virtauksiin ja paine-erojen muodostumiseen. Virtauksen aiheuttamia vaikutuksia energiatehokkuuteen ja rakennuksen kosteustekniseen toimintaan on tarkasteltu RAFNET-materiaalin näissä osioissa. Virtausosion on kirjoittanut HAMK:n lehtori Anssi Knuutila. Virtausosiota on tarkastettu ja kommentoitu RAFNET oppimateriaalin kehityshankkeen palaverissa.

RAFNET 2020 -materiaali on tuotettu yhteishankkeena usean eri ammattikorkeakoulun kanssa. Hankkeeseen ovat osallistuneet LAB-ammattikorkeakoulu, Savonia ammattikorkeakoulu, Jyväskylän ammattikorkeakoulu, Karelia ammattikorkeakoulu, Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu, Oulun ammattikorkeakoulu, Lapin ammattikorkeakoulu ja Hämeen ammattikorkeakoulu. Hankkeen rahoittajana hankeosallistujien lisäksi on toiminut Ympäristöministeriö. Hanke on osa Terveet tilat 2028 -ohjelmaa.

Tekijät

## Sisällysluettelo

<b>Merkinnät</b> .....	<b>7</b>
<b>Luonnonvakiot</b> .....	<b>7</b>
<b>V.1 Johdanto</b> .....	<b>8</b>
<b>V.2 Virtausten hallintatarve</b> .....	<b>10</b>
V.2.1 Virtausten positiiviset vaikutukset.....	10
V.2.2 Virtausten negatiiviset vaikutukset.....	11
V.2.3 Ilman virtausten huomioiminen rakennesuunnittelussa.....	12
<b>V.3 Virtaus fysikaalisena ilmiönä</b> .....	<b>13</b>
V.3.1 Virtausreitti.....	13
V.3.2 Virtausta aiheuttavat voimat.....	14
V.3.3 Virtausta vastustavat voimat virtausreitint pinoilla (Perusilmiö).....	16
V.3.4 Virtauksen luonne.....	17
<b>V.4 Virtaus rakennuksen ympärillä</b> .....	<b>19</b>
V.4.1 Tuuli.....	19
V.4.2 Sade.....	21
<b>V.5 Ilma ja ilman virtauksen oheisilmiöt</b> .....	<b>24</b>
V.5.1 Ilman ominaisuudet.....	24
V.5.1.1 Ilman ominaisuudet fysikaalisena ilmiönä.....	25
V.5.2 Ilman virtauksen oheisilmiöt.....	26
V.5.3 Ilman joukossa olevan aineen virtaus.....	27
<b>V.6 Paine-ero virtausta aiheuttavana tekijänä</b> .....	<b>28</b>
V.6.1 Savupiippuvaikutus.....	29
V.6.2 Tuulen aiheuttama paine.....	33
V.6.3 Koneellisen ilmanvaihdon aiheuttama paine-ero.....	35

<b>V.7</b>	<b>Rakennuksen virtaustekniset ominaisuudet .....</b>	<b>38</b>
<b>V.8</b>	<b>Aineen virtausten laskennallinen tarkastelu .....</b>	<b>39</b>
V.8.1	Ilman virtaus raossa tai putkessa .....	39
V.8.2	Ilman virtaus huokoisen aineen läpi .....	46
V.8.3	Veden virtaus .....	47
	<b>Lähteet ja kirjallisuus .....</b>	<b>50</b>

## Merkinnot

$p$	ilman paine	$Pa$
$\Delta p$	paine-ero	$Pa$
$v$	virtausnopeus	$\frac{m}{s}$
$q_V$	virtauksen tilavuusvirta	$\frac{m^3}{s}$
$q_m$	massavirta	$\frac{kg}{s}$
$q_{50}$	rakennuksen ilmapuotoluku	$\frac{m^3}{m^2 \cdot h}$
$c_p$	lämpökapasiteetti	$\frac{J}{kg \cdot K}$
$k$	materiaalin läpäisevyys	$m^2$
$\rho$	Ilman tiheys	$\frac{kg}{m^3}$
$\eta$	dynaaminen viskositeetti	$Pa \cdot s$
$\mu$	tuulen muotokerroin	

## Luonnonvakiot

$g$	maan vetovoiman kiihtyvyys	$9,81 \frac{m}{s^2}$
$M_i$	ilman moolimassa	$28,964 \frac{g}{mol}$

## V.1 Johdanto

Virtaus on aineen siirtymistä nestemäisessä tai kaasumaisessa olomuodossa. Virtauskykyistä ainetta kutsutaan myös fluidiksi. Virtaavan aineen mukana voi siirtyä myös kiinteitä partikkeleita. Rakennuksissa tapahtuu aina aineen virtausta. Virtauksilla on sekä positiivisia että negatiivisia vaikutuksia. Tämän takia virtauksia pyritään hallitsemaan, joista yleisimpiä tapoja ovat virtausreittien geometrian määrittäminen, materiaali- ja rakennevalinnoilla ja aktiivisella koneellisilla ratkaisuilla. Nämä tehdään huomioiden rakennuspaikan, rakennuksen muodon ja rakenteiden rakennusfysikaalinen toimintaperiaate huomioiden.

Virtausten hallinta rakentamisessa edellyttää seuraavien osatekijöiden osaamista:

- Laminaarisen ja turbulenttisen kitkallisen virtauksen laskentakaavat
- Virtaavien aineiden aineominaisuudet
- Rakennustuotteiden ja -materiaalien ilmanläpäisevyyteen vaikuttavien materiaaliominaisuudet ja rakenneratkaisut.
- Painesuhteisiin vaikuttavat tekijät
- virtausten oheisilmiöt
- Ilmavirtausten ja ilmanpitävyyden mittaukset
- Ilmavirtausten vaikutus rakenneratkaisuiden lämpö- ja kosteustekniseen toimintaan
- Veden virtaus sadevesijärjestelmässä ja tonttialueen kuivatuksessa

Kaasumaisten aineiden virtauksia tarvitaan ilman epäpuhtauspitoisuuden, ilmankosteuden ja lämpöolosuhteiden hallitsemiseksi rakennuksessa ja rakenteissa. Nämä ovat kaasumaisten yhdisteiden virtausten oheisilmiöitä. Ilma on kaasujen seos, joka virtaa rakennuksessa ja rakennuksen ympärillä. Ilman virtaukset vaikuttavat rakennuksen energiatehokkuuteen, kosteustekniseen toimivuuteen. Ilmavirtaukset vaikuttavat myös rakenteiden lämpö- ja kosteustekniseen toimintaan. Ilmavirtauksilla on myös merkittävä vaikutus rakennuksen sisäilman laatuun.

Rakennuksen suunnittelussa ilmavirtauksiin voidaan vaikuttaa rakenteissa suunnitelmalla rakenteisiin tuuletusvälit ja tuuletustilat sekä näihin johtavat tuuletusaukot, jotta luonnollinen ilmanvaihto mahdollistetaan. Rakenteissa tulee olla myös ilmanpitäviä kerroksia, jotta ilmavirtauksia voidaan hallita. Ilmavirtausten suuruuteen voidaan vaikuttaa myös koneellisesti. Rakennuksen tilojen ilmanvaihto voidaan toteuttaa luonnollisena ilmanvaihtona tai koneellisena ilmanvaihtona.



Virtaus edellyttää virtausreitit ja virtausta aiheuttavan voiman. Virtausreitti on avoin tie, jossa virtauskykyinen aine voi virrata. Virtausta aiheuttavat voimat muodostuu sisäisistä tai ulkoisista voimista. Ulkoiset voimat koostuvat paine-eroista, jotka aiheutuvat mm. tuulesta, savupiippuvaikutuksesta tai koneellisesti.

Lisäksi tässä on esitetty myös nestemäisen veden virtaukseen liittyviä asioita. Nestemäisen veden virtausten hallintaa tarvitaan mm. sadevesijärjestelmässä, tonttialueen kuivatuksessa, perustusten kuivatuksessa, märkätiloissa, käyttövesijärjestelmässä, jätevesijärjestelmässä ja vesikiertoisessa lämmitysjärjestelmässä. Nestemäisen veden hallinnan tarkoitus on vesien poisjohtaminen rakennuksessa rakenteiden kuivana pitämisen takia, käyttövesijärjestelmässä lämpimän ja kuuman veden saanti käyttötarkoituksen mukaan ja lämmitysjärjestelmässä veden virtauksen mukana siirtyvän lämpöenergian kuljettaminen.

## V.2 Virtausten hallintatarve

### V.2.1 Virtausten positiiviset vaikutukset

Positiivisia vaikutuksia ilmanvirtauksesta rakenneosissa kuten seinässä ovat ylimääräisen kosteuden, haitallisten ilman epäpuhtauksien ja lämpöenergian siirtäminen haitallisen lämpöenergian poistamiseksi rakenteesta tai suhteellisen kosteuden alentamiseksi.

Ylimääräinen kosteuden poistamista rakenneosasta tarvitaan, jos rakenteeseen on jäänyt rakentamisen ajalta tai sinne virtaa kosteutta, joka ei ilman tuuletusta pääse riittävästi poistumaan. Tähän liittyy myös lainsäädännön asetus rakennuksen kosteusteknisestä toimivuudesta (YM 782/2017). Tämän asetuksen pykälässä 5 on mainittu: *”Rakennuskosteuden ja rakenteisiin ulko- tai sisäpuolelta satunnaisesti kulkeutuvan kosteuden on voitava poistua häirtä aiheuttamatta.”*

Haitallisten ilman epäpuhtauksien poistamisen höydyllinen vaikutus on siinä, että tämän avulla rakenteessa olevan ilman epäpuhtauspitoisuus alenee ja mahdollinen rakenteesta sisäilmaan virtaavan ilman kuljettama epäpuhtausvirta ei aiheuta sisäilman epäpuhtauspitoisuuden nousua haitallisen korkeaksi. Yksi tärkeimmistä esimerkeistä poistaa epäpuhtauksia rakenteesta on alapohjien alaisen maaperän radon-kaasun poiston takia tehtävä radon-poisto-järjestelmä. Tähän asiaan liittyy asetus rakennuksen sisäilmastosta ja ilmanvaihdosta (YM 1007/2017). Asetuksen pykälässä 5 on mainittu: *”Sisäilmassa ei saa esiintyä terveydelle haitallisessa määrin hiukkasmaisia epäpuhtauksia, fysikaalisia, kemiallisia tai mikrobiologisia tekijöitä eikä viihtyisyyttä jatkuvasti heikentäviä hajuja.”*

Lämpöenergian siirtäminen voi olla tarpeellista haitallisen lämpöenergian poistamiseksi. Tästä yhtenä esimerkkinä on yläpohjan tuuletus ulkoilmalla, joka talviaikaan laskee yläpohjan tuuletustilan lämpötilaa ja pienentää lumen sulamisen ja uudelleen jäätymistä ja tämän aiheuttamaa kosteusvaurioriskiä. lämpöenergian siirtäminen voi olla tarpeen myös rakenteessa olevan suhteellisen kosteuden alentamiseksi, jotta pienennetään homehtumisriskiä. Kun lämpöenergiaa tuodaan ilmavirtauksen mukana, lämpötila nousee ja samalla ilman suhteellinen kosteus laskee. Tässä ilmavirtauksen positiivinen vaikutus riippuu siitä, onko tuotavan tilan lämpötila matalampi kuin sinne virtaavan ilman.

## V.2.2 Virtausten negatiiviset vaikutukset

Negatiivisia vaikutuksia ilman virtauksesta aiheutuu energiatehokkuuden huonontumisesta, Kosteuden kertyminen rakenteeseen ilmavirtausten vaikutuksesta ja epäpuhtauksien kulkeutumisesta rakenteista sisäilmaan. Negatiivisia vaikutuksia pyritään usein minimoimaan ilmatiiviillä rakennekerroksilla ja liitoksilla. Tätä rakennekerrosta kutsutaan ilmasuluksi. Myös ilmavirtaukset tuuletusväleissä ja tuuletustiloissa pyritään pitämään kohtuullisina.

Ilman virtaukset lisäävät lämpöhäviöitä rakenteissa. Tarpeettoman suuri ilmanvaihto tuuletusvälissä tai tilassa lisää hieman lämpöhäviöitä laskemalla näissä tiloissa lämpötilan lähelle ulkolämpötilaa. Tästä esimerkkinä esimerkiksi ryömintätilainen alapohja, jossa talviaikaan tarpeettoman suuri ilmanvaihto laskee lämpötilan reilusti pakkasen puolelle lisää hetkittäin lämpöhäviötä jopa kymmeniä prosentteja. Ilman virtaukset rakenneosan läpi myös lisäävät lämpöhäviöitä ja tämän vaikutus voi olla hyvinkin suuri, jos rakennuksen vaipan ilmanpitävyys on heikko.

Ilmavirtausten haitallisin vaikutus kosteusteknisen toimivuuden näkökulmasta aiheutuu kosteuskonvektiosta (vesihöyryn konvektiolla), eli kosteuden kulkeutumisesta ilmavirtauksen mukana. Kosteuskonvektio kasvattaa rakenteessa olevan kosteuden määrää, jos ilmavirtaussuunta rakenneosan läpi on kosteammasta tilasta kohti kuivempaa tilaa. Asuinrakennuksissa kosteuskonvektion vaikutus on negatiivista, jos ulkoilmaa kosteampi sisäilma virtaa rakennuksen vaipan epätiiveyskohtien läpi kohti ulkoilmaa.

Ilmavirtaus voi kuljettaa myös epäpuhtauksia rakennuksen ulkopuolelta tai rakenteista sisäilmaan. Se kuinka hyvin tästä näkökulmasta ilmavirtaukset tulee estää riippuu ulkotilojen ja rakenteiden epäpuhtauspitoisuuksista. Home- ja kosteusvaurioituneiden rakennusten tapauksessa sisäilman laatua voidaan vaikuttaa positiivisesti parantamalla rakenteiden ilmanpitävyyttä ja hallitsemalla painesuhteita.

## V.2.3 Ilman virtausten huomioiminen rakennesuunnittelussa

Rakennesuunnittelussa ilman virtausten positiiviset ja negatiiviset vaikutukset huomioidaan rakennusten energiatehokkuuden ja kosteusteknisen toimivuuden suunnittelussa. Tässä RAFNET oppimateriaalisarjasta ilman virtaukset on huomioitu muissa osioissa.

Rakennesuunnittelussa ilmavirtausten positiiviset ja negatiiviset vaikutukset huomioidaan tavanomaisen vaatimusluokan suunnittelussa tuuletusrakojen ja aukkojen ohjeistusten avulla. Julkisivun suunnittelussa Ympäristöministeriön ohjeen rakennuksen kosteusteknisestä suunnittelusta 2020 (Lehtinen T., 2020) on annettu esimerkiksi ohjearvo tuuletusvälin paksuudesta tiilistä muuratun julkisivun takana, joka on 30 mm. Asetuksen 782/2017 mukaan tuuletusvälit ja tilat on suunniteltava ja rakennettava niin että tilat nämä ovat kokonaisuudessaan virtausreitteinä. Tuuletusvälit tai tilat avautuvat ulkoilmaan tuuletusraoilla, näiden tulee olla sijoitettu niin että joko tuulen tai lämpötilaerojen vaikutuksesta muodostuu paine-eroa tuuletusrakojen välille, joka aiheuttaa ilman virtausta tuuletusvälissä. Tuuletusrakojen koolle on olemassa ohjeellisia mittoja esimerkiksi ohjeessa RIL 107-2012 Rakennusten veden ja kosteudeneristysohjeet.

## V.3 Virtaus fysikaalisena ilmiönä

Virtaus edellyttää avointa virtausreittiä ja voimaa, joka siirtää ainetta. Aineen siirtämiseen vaikuttava voima on usein ilmaistu pinta-alayksikköön kohdistuvana voimana eli paine-erona. Paine-eron yksikkö on Pascal eli voiman yksikkö Newton pinta-alayksikköä kohden [ $\text{Pa}=\text{N}/\text{m}^2$ ]. Virtausta vastustavana ilmiönä on nesteen viskositeetista virtauksen reunoille aiheutunut kitka. Tasapainotilanteessa virtausta aiheuttavat ja vastustavat voimat ovat yhtä suuret.

### V.3.1 Virtausreitti

Virtausreitti on reitti, jota pitkin aine kulkee. Kaasu täyttää virtausreitit kokonaisuudessaan. Neste ei välttämättä täytä koko reittiä vaan osa reitistä voi olla ilman täyttämä.

Veden virtausreitti on joko kalteva pinta, kouru, uoma tai putki. Se voi olla myös huokoisen materiaalin huokosverkosto.

Avoin ilmanvirtausreitti on rakenneosissa tuuletusväli tai tuuletustila, joka avautuu ulkoilmaan molemmista päistä tuuletusraon tai tuuletusaukon kautta. Ilmanvirtausreitti voi olla myös rakennusmateriaalin avoin huokosrakenne, jolloin ilma voi siirtyä rakennusmateriaalin läpi. Ilmanvirtausreitit teknisinä tietoina on reitin mittasuhteet ja geometria. Kun ilmanvirtausreitillä on huokoinen materiaali, ilmanvirtausreitit teknisinä tietoina on huokoisen materiaalin mittasuhteet ja materiaalin läpäisevyyttä kuvaava materiaaliominaisuus läpäisevyys tai ilmanläpäisevyys.

Ilmanvirtausta ilmanvirtausreitillä vastustaa kitka. Ilmanvirtausreitillä kitkavoimien suuruus on yhtä suuri kuin virtausta aiheuttaman voiman suuruus. Ilmanvirtausnopeus määräytyy voimatasapainon mukaan. Kun virtausta aiheuttavan voiman, paine-eron, suuruus kasvaa virtausnopeus kasvaa. Virtausnopeuden kasvaessa myös virtausta vastustavan kitkan suuruus kasvaa. Virtaavan aineen viskositeetti vaikuttaa kitkan suuruuteen. Virtaavan aineen materiaaliominaisuutena viskositeetti on tärkein ominaisuus.

## V.3.2 Virtausta aiheuttavat voimat

Virtausta aiheuttava voima aiheutuu, joko tarkastelualueen reunoilta tai tarkastelutilavuuden virtaavan aineen painovoimasta tai sekä että. Tarkastelutilavuuden sisällä painovoima aiheuttaa aineeseen painejakauman korkeuden suhteen hydrostaattisen paineen kaavan mukaisesti. Hydrostaattisen paineen kaava on seuraava.

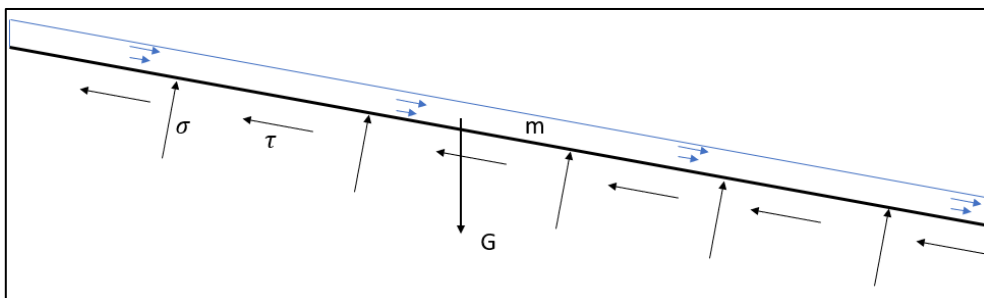
$$p = \rho \cdot g \cdot h \quad (\text{Kaava V.3.1})$$

jossa  $p$  on ainepatsaan alle aiheutunut paine  
 $\rho$  on aineen tiheys  
 $g$  maan vetovoiman kiihtyvyyys  
 $h$  on ainepatsaan korkeus

Nesteen virtauksen tapauksessa painovoima on virtausta ajavana voimana, jos tarkastelualueella on nestepinnan tasossa eroa suhteessa painovoiman suuntaan. Nesteen virtaukseen voi vaikuttaa myös paine-ero esimerkiksi tarkasteltaessa putkenpätkän päiden välillä.

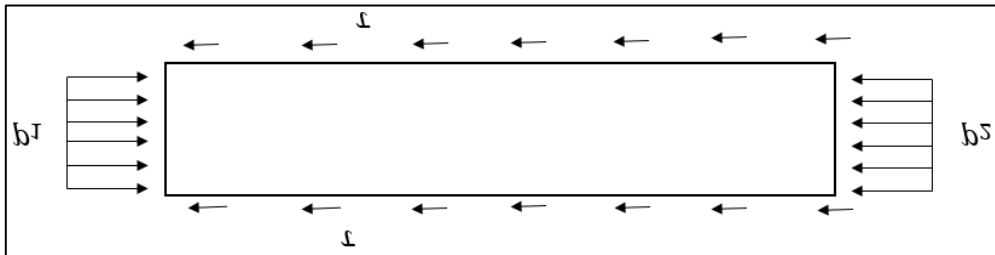
Ilman virtauksen tapauksessa virtausta aiheuttavana voimana on pääasiassa paine-ero. Tarkastelualueen sisällä olevat lämpötilaerot voivat myös aiheuttaa virtauksia.

Nesteen virratessa kaltevalla pinnalla, kourussa, uomassa tai putkessa virtausta aiheuttavan voiman suuruuteen vaikuttaa maan vetovoima, veden massa ja kaltevuuskulma. Tasapainotilassa virtausta vaikuttavan voiman suuruus on yhtä iso kuin virtausta vastustavien kitkavoimien suuruus. Periaatekuva on esitetty kuvassa V.3.1.

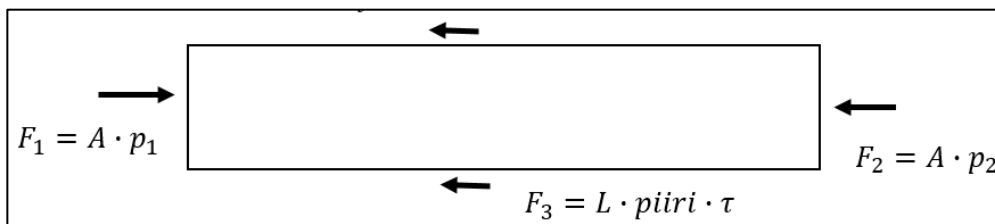


**Kuva V.3.1.** Nestemäisen veden virtaus kaltevalla pinnalla.

Kun virtausta aiheuttaa vain paine-ero esimerkiksi putken päissä, virtausta vaikuttavan voiman suuruuteen vaikuttaa paine-ero ja putken poikkileikkauspinta-ala. Virtausta vastustavat voimat koostuvat virtauksen pinnoilla olevasta kitkasta. Periaatekuva on esitetty kuvissa V.3.2 ja V.3.3.



**Kuva V.3.2.** Periaatekuva putken virtausta aiheuttavasta paine-erosta putken päiden välillä ja kitkasta



**Kuva V.3.3.** Periaatekuva putken virtausta vaikuttavista voimaresultanteista. Tasapainotilassa voimien summa on nolla. Kuvassa symboleilla  $p_1$  ja  $p_2$  esitetään ilmanpainetta putken päissä ja symbolilla  $\tau$  virtauksen aiheuttamaa leikkausjännitystä putken pinnoilla.

Ilman virtauksen yhteydessä paine-erot johtuvat savupiippuvaikutuksesta, tuulesta ja/tai koneellisesta ilmanvaihdosta. Kyseessä on luonnollinen ilmavirtaus, kun paine-ero johtuu vain savupiippuvaikutuksesta tai tuulesta. Veden virtauksen yhteydessä painetta esimerkiksi veden pinnan korkeuseroista, jolloin muodostuu

Jos virtausnopeudet eroavat tarkastelualueen reunoilla tulee huomioida myös dynaamisen paineen vaikutus tasapainoyhtälöön, Bernoullin laki.

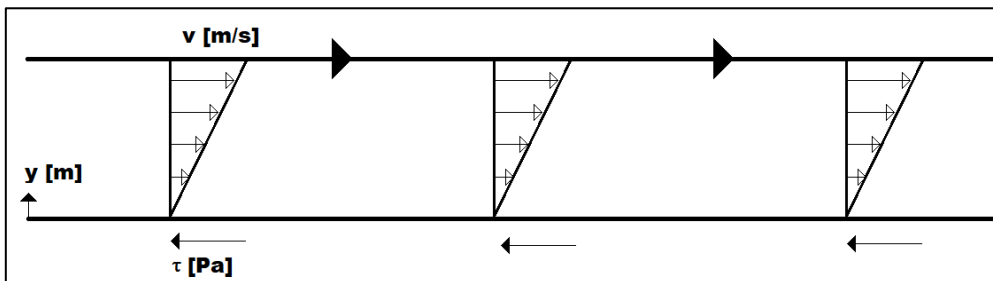
### V.3.3 Virtausta vastustavat voimat virtausreitin pinnoilla (Perusilmiö)

Virtausta vastustavana voimana pinnoille muodostuu kitkaa, virtauksesta. Kyseinen voima välittyy virtaavan aineen viskositeetin välityksellä. Kitka on leikkausjännitys, joka välittyy pinnalle, kun virtaavassa aineessa on virtausnopeusjakauma. Leikkausjännitys on kokeellisten määritysten mukaan useimmille virtaaville aineille dynaaminen viskositeetti kertaa virtausnopeuden gradientti (Cengel 2007, s 340). Virtausnopeuden gradientti kuvaa sitä, kuinka virtausnopeus kasvaa, kun siirrytään pois päin tarkasteltavasta pinnasta. Leikkausjännitys lasketaan kaavalla V.3.2.

$$\tau = \eta \cdot \frac{dv}{dy} \quad (\text{Kaava V.3.2})$$

jossa  $\tau$  on leikkausjännitys pinnalla  
 $\eta$  on virtaavan aineen dynaaminen viskositeetti  
 $\frac{dv}{dy}$  on virtausnopeusjakauman gradientti reunalla

Virtaavan aineen dynaaminen viskositeetti on aineen ominaisuus, jonka suuruus voidaan määrittää kokeellisesti fysikaalista ilmiötä kuvaavassa koejärjestelyssä.



**Kuva V.3.4.** Aineen dynaaminen viskositeetti  $\mu$  voidaan määrittää kokeellisesti, kun muodostetaan virtausnopeusjakauma ja mitataan muodostunutta leikkausjännitystä.

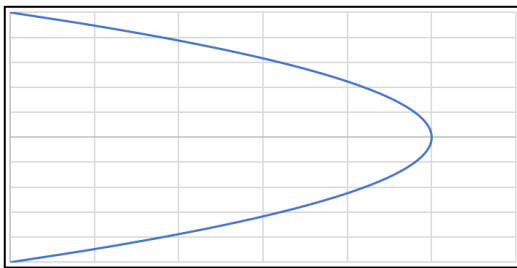
Dynaaminen viskositeetti on aineille lämpötilasta riippuva. 20 Celsiusasteen lämpötilassa dynaaminen viskositeetti ilmalle on  $17,4 \cdot 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{s}$  ja vedelle  $1002 \cdot 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ .



## V.3.4 Virtauksen luonne

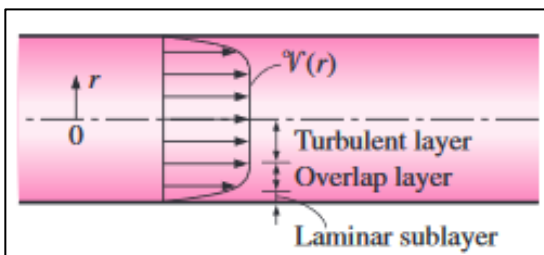
Virtaus ilmanvirtausreitillä voi olla suoraviivaista tai pyörteistä. Suoraviivaista virtausta kutsutaan laminaariseksi virtaukseksi ja pyörteellistä virtausta turbulentsiksi virtaukseksi. Suoraviivaisessa virtauksessa virtaavan partikkelin kulkurata menee virtauksen kulkusuunnan mukaan ja on järjestäytynyttä, eikä sekoitu muuhun virtaukseen. Pyörteellisessä virtauksessa partikkelin kulkurata on satunnaista kulkien keskimäärin virtauksen kulkusuunnan mukaan. Turbulenttisessa virtauksessa partikkelit sekoittuvat satunnaisista kulkusuunnista johtuen.

Laminaarisessa virtauksessa kahden kiinteän pinnan välissä virtausnopeusjakauma on sellainen, jossa virtausnopeus virtausreitän reunalla kiinteän aineen rajapinnalla on 0 ja nopeus kasvaa kohti keskikohtaa, parabolinen jakauma, kuva V.3.5.



**Kuva V.3.5.** Laminaarisen virtauksen nopeusjakauma laminaarisessa virtauksessa kahden tason välissä. Tasojen pinnalla virtausnopeus on 0.

Virtaus voi olla myös pyörteellistä. Pyörteellisen virtauksen keskimääräinen nopeuden jakauma poikkeaa laminaarisen virtauksen nopeusjakaumasta. Turbulenttisessa virtauksessa putken tai pinnan reunalla on ohut laminaarinen virtauskerros, jonka paksuus on usein vain yksi prosentti putken halkaisijasta, keskellä putkea keskimääräinen virtausnopeus on hyvin tasainen (Cengel 2007, s 443). Turbulenttisessa virtauksessa putken karheus vaikuttaa virtausvastukseen.



**Kuva V.3.6.** Virtausnopeusjakauma turbulentsisessa virtauksessa. (Cengel 2007, s.443).

Siihen onko virtaus turbulenttista vai ei, riippuu virtauksen nopeudesta, virtauksen hydraulisen halkaisijasta, virtaavan aineen tiheydestä ja dynaamisen viskositeetista.

Näihin liittyvä tunnusluku on Reynoldsin luku. Kokeellisten määritysten mukaan virtaus on laminaarista, jos Reynoldsin luku on alle 2500 (Cengel 2007).

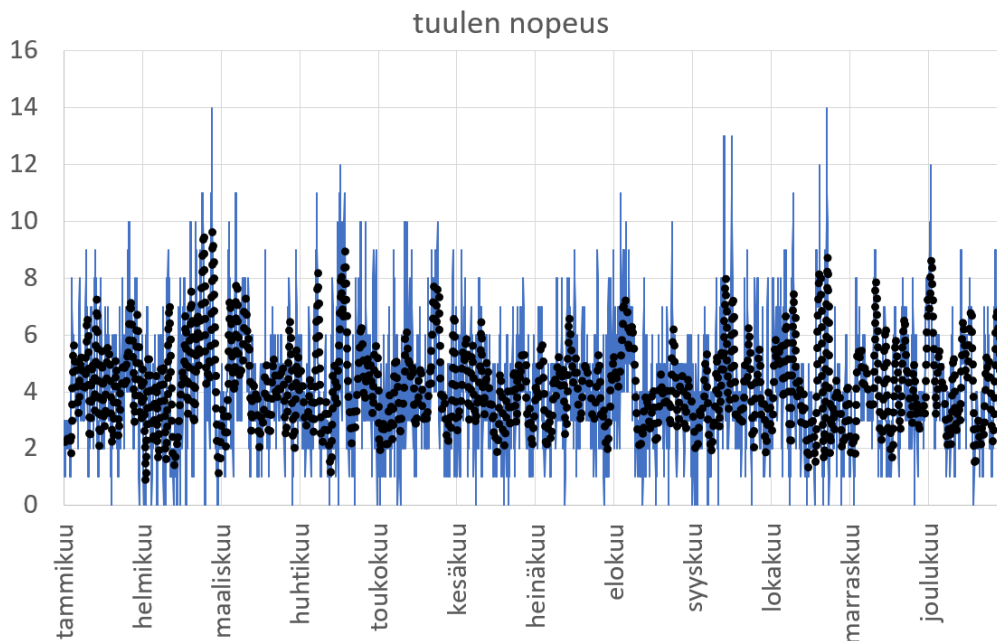
Tämän raja-arvon perusteella ilman virtaus on laminaarista, jos virtauksen nopeuden ja hydraulisen halkaisijan tulo on alle  $0,036 \text{ m}^2/\text{s}$ . Hydraulinen halkaisija on tuuletusvälissä kaksi kertaa tuuletusvälin paksuus. Tuuletusvälissä, jonka paksuus  $0,025\text{m}$ , ilman virtaus on laminaarista, jos virtausnopeus on alle  $0,72 \text{ m/s}$ .

Se onko virtaus turbulenttista vai laminaarista vaikuttaa virtausta vastustaviin tekijöihin ja lämmön siirtymiseen, koska turbulenttisessa virtauksessa rajakerroksen paksuus on merkittävästi ohuempi.

## V.4 Virtaus rakennuksen ympärillä

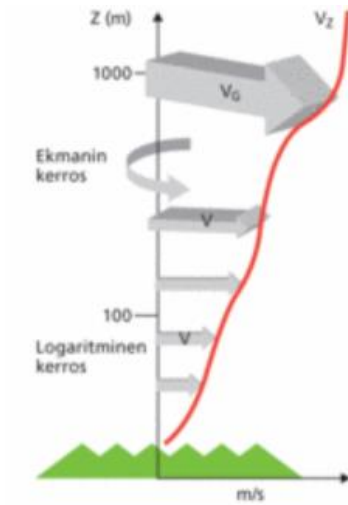
### V.4.1 Tuuli

Ilman virtaus rakennuksen ympärillä riippuu paikallisista tuuliolosuhteista. Paikallisiin tuuliolosuhteisiin vaikuttaa rakennuksen korkeus, muoto, maaston ominaisuudet, maantieteellinen sijainti ja ajankohta. Tuuli on aina ajasta riippuvaa. Rakennuspaikalla tuulen nopeus on jakautunut korkeuden suhteen siten että ylöspäin mentäessä maanpinnasta tuulen nopeus kasvaa lähestulkoon aina.



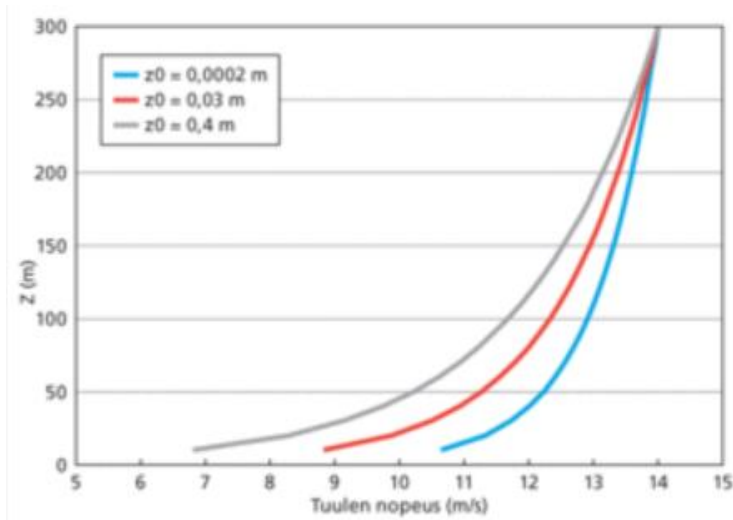
**Kuva V.4.1.** Tuulen nopeuden tuntikesiarvon ja päiväkesiarvon vaihtelu testisäädätan säädätassa. Tuulen nopeus 10 metrin korkeudella, Vantaa, (YM 2012). [https://www.ym.fi/fi-FI/Maankaytto\\_ja\\_rakentaminen/Lainsaadanto\\_ja\\_ohjeet/Rakentamismaarayskokoelma/Energiat\\_ehokkuus](https://www.ym.fi/fi-FI/Maankaytto_ja_rakentaminen/Lainsaadanto_ja_ohjeet/Rakentamismaarayskokoelma/Energiat_ehokkuus)

Tuulen nopeus maanpinnan yläpuolella kasvaa logaritmisesti ylöspäin mentäessä tietyn matkan. Rakennuksen korkeimpia pilvenpiirtäjiä lukuun ottamatta ovat logaritmisella kerroksessa. Logaritmisen kerroksen yläpuolella on Ekmanin kerros ja tämän yläpuolella strotosforinen virtaus. Näitä kerroksia on esitetty kuvassa V.4.1.



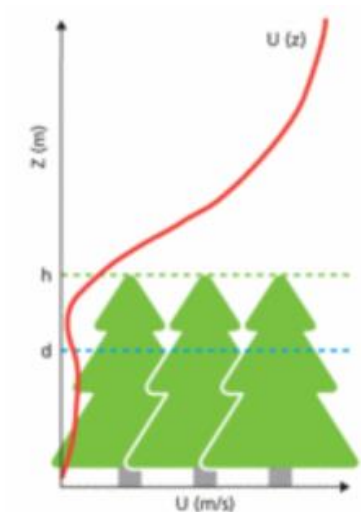
**Kuva V.4.2.** Ilman virtausnopeusjakauma rajakerroksessa. Rajakerroksessa alueet ovat logaritminen kerros, Ekmanin kerros ja Stratosfobinen virtaus.

Logaritmisella alueella virtauksen suunta on pääsääntöisesti korkeudesta riippumaton (Ilmatieteen laitos Suomen tuuliatlas. Maaston rosoisuus vaikuttaa logaritmisien alueen muotoon. Kuvassa V.4.3 on esitelty rosoisuuden vaikutus nopeusjakaumaan, jos 300 m korkeudella virtausnopeus on 14 m/s.



**Kuva V.4.3.** Virtausnopeusjakauma logaritmisella alueella maaston rosoisuuden mukaan, kun virtausnopeus 300 m korkeudella on 14 m/s. Sisinen kuvaaja kuvaa virtausta avomerellä, punainen virtausta avoimella niityllä ja harmaa virtaus taajaman puistoalueella.

Logaritmisien alueiden alareunassa voidaan olettaa olevan nollassa siirtymä. Esimerkiksi metsässä nollassa siirtymä on 0,7 kertaa puuston korkeus. Tämä on esitetty kuvassa V.4.4.



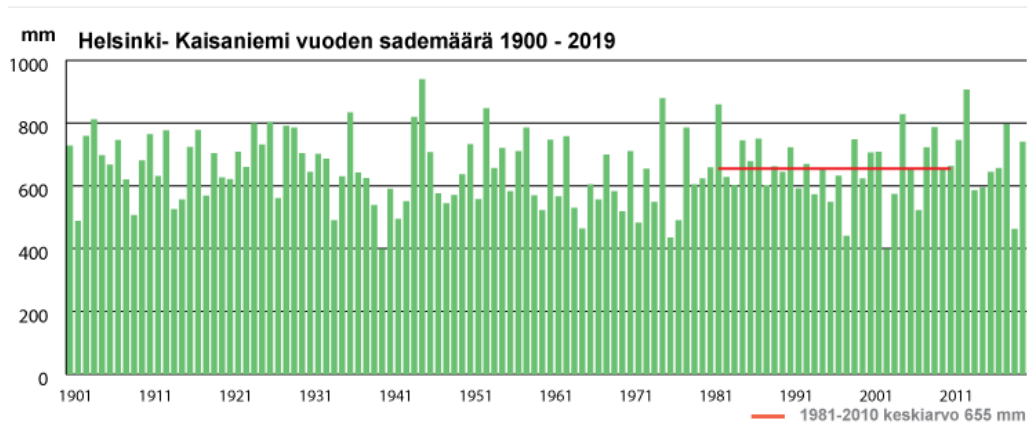
**Kuva V.4.4.** Virtauksen logaritmisien virtausnopeusjakauman alueen siirtymä metsäisessä maastossa.

Tuulen virtausnopeuden hitaus suojaisessa maastossa on tuulikuormien kannalta positiivista, mutta tuulen vaikutus rakenteiden tuuletusrakojen ja tilojen tuuletuvuuteen heikentyy merkittävästi, kun rakennus on metsäisessä maastossa. Tämä vaikutus on rakenteiden suunnitteluohjeissa usein huomioitu.

## V.4.2 Sade

Vesisade on taivaalta nestemäisessä muodossa tulevaa veden virtausta. Vesisateen suuruus vaihtelee voimakkaasti ajasta riippuen. Vesisade kohdistuu pääasiassa rakennuksen ja tonttimaan vaakapinnoille, mutta tuulen vaikutuksesta riippuen sadetta kohdistuu myös rakennuksen pystypinnoille. Sade voi tulla myös lumena alas. Lumena tullut vesi kulkeutuu sadevesijärjestelmän kautta pois rakennuksesta sulamisvetenä. Sade ja sulamisvesiä kutsutaan hulevesiksi. Rakennuksesta hulevesiä johdetaan vesikaton ja sadevesijärjestelmän avulla hallitusti pois rakennuksesta. Tonttialueella hulevesiä johdetaan pois rakennuksen viereltä hallituilla maanpinna kaadoilla. Hulevesien hallintaan ja tonttialueen kuivatukseen liittyy sadevesien imeyttämistä, salaojitusta ja viivytysaltaita, joiden kautta hulevesiä johdetaan tonttialueen ulkopuolelle kunnalliseen hulevesijärjestelmään tai ojiin.

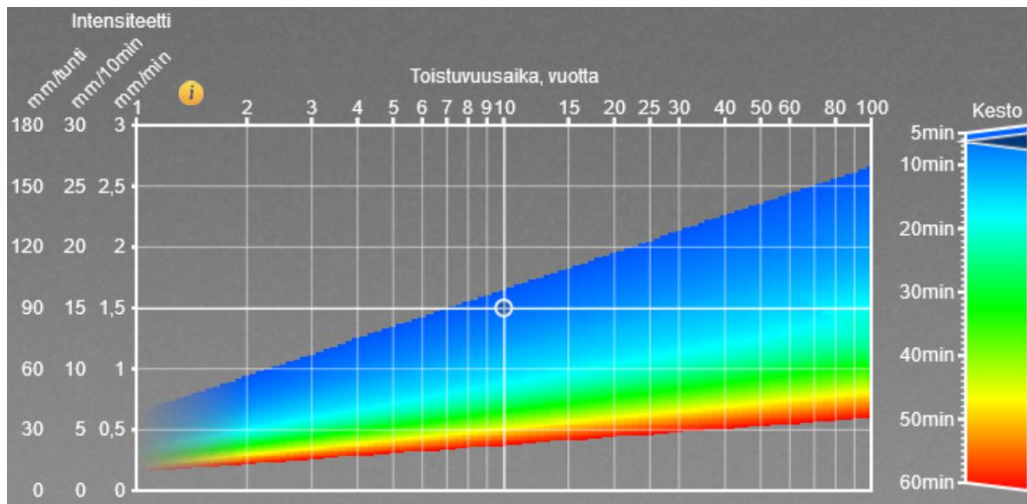
Sateen määrä vaihtelee ajallisesti voimakkaasti siten, että myös vuosien välillä on eroja. Tästä on esitetty esimerkki Helsingissä vuosittaisista sademääristä vuosien 1900–2019 välillä kuvassa V.4.5.



**Kuva V.4.5.** Vuosittaisen sademäärän vaihtelu Helsingissä vuosien 1900–2019 välillä on ollut 400–940 mm välillä (Ilmatieteen laitos 2020a).

Suomen ilmastolle on tavanomaista, että talvella sataa usein, mutta sade on heikkoa. Kesällä lämpötilat ovat korkeampia, jolloin ilmaan pystyy sitoutumaan enemmän kosteutta. Tämän takia kesällä sataa hetkellisesti ravakasti, mutta sateet ovat kuitenkin lyhyitä. Kesällä kohtuullisen iso osa sateista on kuurosateita, joiden pituus on 20–30 minuuttia (Ilmatieteenlaitos 2020b).

Sadevesijärjestelmää kuormittavimmat tilanteet liittyvät kesäaikaisiin kuurosateisiin. Lyhytkestoisten sateiden kuormitushuippujen toistuvuus aika Suomen tilastojen perusteella on esitetty kuvassa V.4.6. (Ilmatieteenlaitos 2020c). Esimerkiksi tilastojen mukaan kerran kymmenessä vuodessa esiintyy sateita, jonka intensiteetti on yli 1,5 mm/min.



**Kuva V.4.6.** Lyhytkestoisten sateiden rankkuus ja toistuvuus aika Suomessa (Ilmatieteennlaitos 2020c)

Hulevesistä lumen sulamisvedet, voivat lisäksi aiheuttaa vesistöissä tulvatilanteita ja tonttialueilla erikoistilanteita, kun sulamisvedet eivät pääse imeytymään maaperään ja silloin jos veden poisjohtamiseen tarkoitetut putkistot ovat päässeet jäätymään.

## V.5 Ilma ja ilman virtauksen oheisilmiöt

### V.5.1 Ilman ominaisuudet

Ilma on kaasujen seos. Kuivassa ulkoilmassa merenpinnan tasolla on noin 78 % typpeä, 21 % happea ja 1 % argonia ja lisäksi pieniä määriä muita kaasuja (Laitinen Tiera 2019). Ilmanpaine vaihtelee normaali ilmanpaineen 101325 Pa molemmilla puolilla merenpinnan tasolla. Ilmanpaineen aiheuttaa ilman massa tarkastelupisteen yläpuolella ja maan vetovoima. Ilman paine nousee noin 8 Pascalia metriä kohden noustessa merenpinnan tasosta ylöspäin. Ilman tiheys normaali-ilmanpaineessa on riippuvainen ilman lämpötilasta. Ilman tiheys kahdenkymmenen asteen lämpötilassa on noin  $1,2 \text{ kg/m}^3$ . Ilman tiheys normaalipaineessa eri lämpötiloissa saadaan jakamalla luku  $353 \frac{\text{kg}\cdot\text{K}}{\text{m}^3}$  ilman lämpötilalla Kelvin asteissa.

Taulukoituna ilman tiheydet ovat:

**Taulukko V.5.1.** Ilman lämpötilasta riippuva tiheys

lämpötila		tiheys
$\Theta$	T	$\rho$
[C]	[K]	[kg/m <sup>3</sup> ]
-20	253,15	1,394
-10	263,15	1,341
0	273,15	1,292
10	283,15	1,247
20	293,15	1,204
30	303,15	1,164



## V.5.1.1 Ilman ominaisuudet fysikaalisena ilmiönä

Ilma on reaalikaasu ja se käyttäytyy likimain ideaalikaasuteorian mukaisesti. Kaasujen käyttäytymisessä kaasumolekyylien lämpöliike ja molekyylien väliset törmäykset vaikuttavat moniin ilman ominaisuuksiin. Ideaalikaasun tilanyhtälö on

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T \quad (\text{Kaava V.5.1})$$

jossa	$p$	on	kaasun paine
	$V$		kaasun tilavuus
	$n$		ainemäärä
	$R$		yleinen kaasuvakio ( $8,314 \frac{J}{K \cdot mol}$ )
	$T$		kaasun lämpötila

Ideaalikaasun tilanyhtälön avulla voidaan mm. määrittää mm. ilman tiheyden lämpötilariippuvuus. Ilman tiheyden lämpötilariippuvuuden laskentakaava saadaan, kun ideaalikaasun tilanyhtälö johdetaan seuraavaan muotoon:

$$\rho = \frac{p \cdot M_i}{R \cdot T} \quad (\text{Kaava V.5.2})$$

jossa	$\rho$		ilman tiheys
	$p$	on	ilman paine (NTP olosuhde $p=101325\text{Pa}$ )
	$M_i$		ilman moolimassa ( $28,964 \frac{g}{mol}$ )
	$R$		yleinen kaasuvakio
	$T$		ilman lämpötila

Jonka jälkeen sijoitetaan kaavaan V.5.2 ilmanpaineen, ilman moolimassan ja yleisen kaasuvakion vakioarvot. Tällöin ilman tiheyden laskentakaava saadaan muotoon.

$$\rho = \frac{353 \frac{kg \cdot K}{m^3}}{T} \quad (\text{Kaava V.5.3})$$

jossa	$\rho$		ilman tiheys
	$T$		ilman lämpötila Kelvin yksikössä

ilmaan sitoutuu lämpöenergia ilman lämmitessä. Ilmakilon lämmittämiseen yhden asteen verran tarvittavaa energiamäärää kutsutaan ilman lämpökapasiteetiksi. Ilman lämpökapasiteetin suuruus on  $1000 \frac{J}{kg \cdot K}$ . Ilman sisäenergian suuruuteen vaikuttaa myös sen sisältämän vesihöyryn määrä, koska vesihöyryn höyrystäminen nesteestä sitoo lämpöenergiaa. Ilman sisäenergiämäärää yhtä ilmakiloa kohden kutsutaan ilman entalpiaksi. ilman entalpia määritetään perinteisesti Mollier diagrammista. Ilman entalpia voidaan laskea myös seuraavalla laskukaavalla.

$$h = c_p \cdot \rho \cdot \theta_i + h_{fv} \cdot v_i \quad (\text{Kaava V.5.4})$$

jossa	$h$	ilman entalpia $\left[\frac{J}{m^3}\right]$
	$c_p$	ilman lämpökapasiteetti $\left(1000 \frac{J}{kg \cdot K}\right)$
	$\rho$	ilman tiheys
	$\theta_i$	ilman lämpötila $[\text{°C}]$
	$h_{fv}$	veden höyrystymisen faasimuutoslämpö $\left(2\,500\,000 \frac{J}{kg}\right)$
	$v_i$	ilman kosteuspitoisuus $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$

## V.5.2 Ilman virtauksen oheisilmiöt

Energian siirtyminen ilmavirtauksen mukana. Jos ainetta virtaa systeemiin (rakennus tai muu tila) ja sieltä pois ja näiden virtausten lämpötiloissa on eroa, systeemistä poistuu tai tulee energiaa. Virtauksen mukana virtaava aineen sisäenergiaan varastoitunutta energiaa virtaa. Kun faasimuutoksia ei tapahdu virtaavan aineen lämpökapasiteetti  $c_p$ , virtauksen tilavuusvirta  $q_V$ , tiheys  $\rho$  ja lämpötilaero ( $T_1 - T_2$ ) vaikuttavat energiavirtaan.

$$\phi = q_V \cdot \rho \cdot c_p \cdot (T_1 - T_2) \quad (\text{Kaava V.5.5})$$

jossa	$\phi$	lämpövirta [W]
	$q_V$	ilmavirtauksen tilavuusvirta
	$\rho$	ilman tiheys
	$c_p$	ilman lämpökapasiteetti $\left(1000 \frac{J}{kg \cdot K}\right)$
	$T_1$	Systeemiin sisään virtaavan ilman lämpötila
	$T_2$	Systeemistä pois virtaavan ilman lämpötila

Ilmavirtauksen energiavirtaan voi vaikuttaa myös systeemiin virtaavan ja sieltä poistuvan ilman kosteuspitoisuuden erot. Yleisemmässä muodossa yhtälö on

$$\phi = q_m \cdot (h_1 - h_2) \quad (\text{Kaava V.5.6})$$

jossa	$\phi$	lämpövirta [W]
	$q_m$	ilmavirtauksen massavirta
	$h_1$	Systeemiin sisään virtaavan ilman entalpia
	$h_2$	Systeemistä pois virtaavan ilman entalpia

### V.5.3 Ilman joukossa olevan aineen virtaus

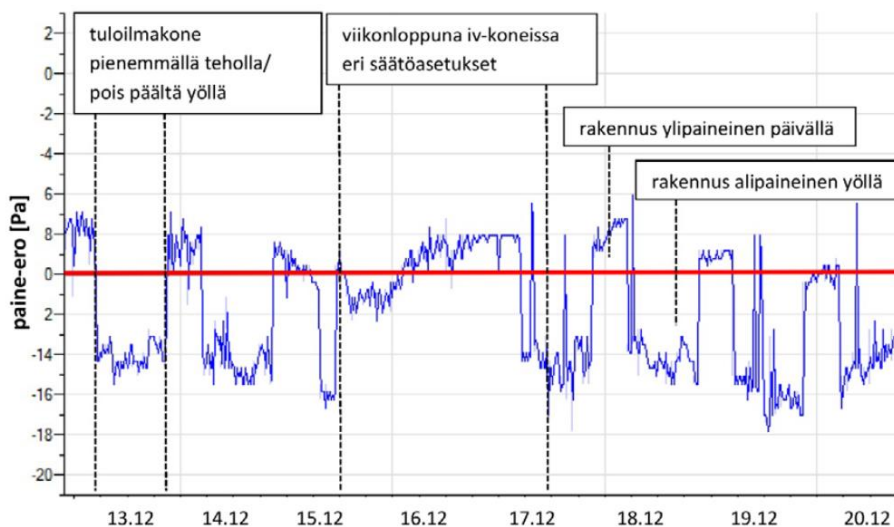
Ilma on seos erinäisiä kaasuja. Jos virtaava materiaali sisältää muuta ainetta systeemiin menevä ja poistuva virtaus lisää tai poistaa kyseistä ainetta systeemistä. Tällöin tämän toisen aineen nettovirta saadaan, kun tiedetään tilavuusvirta  $q_V$  ja systeemiin virtaavan ja sieltä poistuvan toisen aineen pitoisuusero ( $c_1 - c_2$ ).

$$q_{m2} = q_V \cdot (c_1 - c_2) \quad (\text{Kaava V.5.7})$$

jossa	$q_{m2}$	on	epäpuhtauden massavirta
	$q_V$		ilmavirtauksen tilavuusvirta
	$c_1$		systeemin virtaavan ilman epäpuhtauspitoisuus
	$c_2$		systeemistä virtaavan ilman epäpuhtauspitoisuus

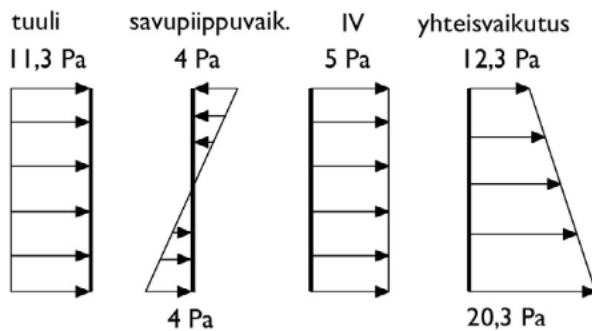
## V.6 Paine-ero virtausta aiheuttavana tekijänä

Paine-erot aiheuttavat ilman liikkeitä, koska virtauskykyinen aine pyrkii voimatasapainoon. Kun virtaava aine on liikkeessä, viskositeetin vaikutuksesta syntyy myös virtausta vastustavia voimia. Rakennustekniikassa rakennusta tarkastellaan usein omana kokonaisuutena virtausteknisesti. Myös rakennus voidaan virtausteknisesti jakaa pienempiin osiin. Tarkasteltaessa rakennusta kokonaisuutena rakennuksen vaippa rajaa paine-eroja epätasaisesti ja ajasta riippuvasti. Mitattaessa paine-eroja rakennuksen vaipan yli, mittaustulokseen vaikuttaa mittauskohdan vaipassa ja mittauksen ajankohta. Tämän takia paine-erojen selvittäminen tarkemmin edellyttää monia mittauspisteitä ja pidempiaikaisia paine-erojen seurantamittauksia.

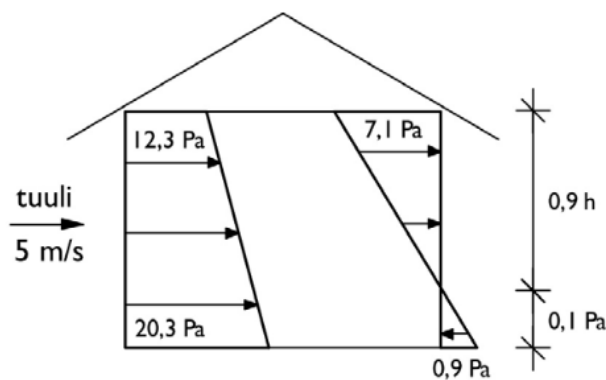


**Kuva V.6.1.** Esimerkki paine-eron mittaustuloksesta rakennuksessa, jossa on koneellinen ilmanvaihto. (Ympäristöopas 2016, s.122)

Paine-erojakauman rakennuksen vaipan yli on seurausta savupiippuvaikutuksen, tuulen, koneellisen ilmanvaihdon vaikutuksesta. Paine-eron suuruusluokka rakennuksen vaipan yli vaihtelee pääasiassa välillä -30 - 30 Pa. Asuinrakennuksissa osatekijöiden vaikutus esiintyy niin, että savupiippuvaikutus aiheuttaa rakennuksen alaosiin alipainetta, ja yläosiin ylipaineet, tuuli aiheuttaa tuulen puolelle alipaineen ja tuulen vastaiselle sivulle ylipaineen ja ilmanvaihto ilmanvaihtojärjestelmästä ja sen säädöistä riippuen joko yli- tai alipainetta koko ilmanvaihto-osastoon.



**Kuva V.6.2.** Esimerkki savupiippuvaikutuksen, tuulen ja ilmanvaihtojärjestelmän aiheuttama paine-erojakauma rakennuksen seinärakenteelle sisä- ja ulkoilman välille korkeudesta riippuen (Ympäristöopas 2016, s.122).

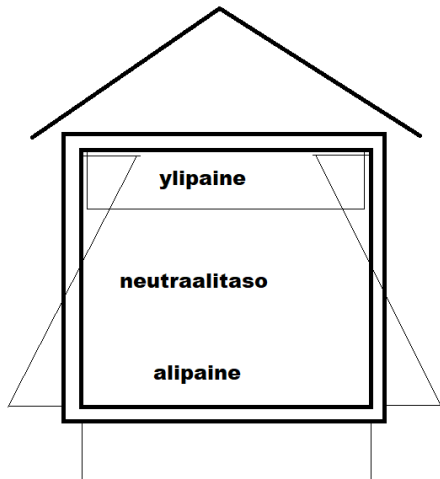


**Kuva V.6.3.** Esimerkki paine-eron muodostumisesta yhteisvaikutuksesta rakennuksen tuulen ja tuulenvastaisella puolella (Ympäristöopas 2016, s.122).

## V.6.1 Savupiippuvaikutus

Savupiippuvaikutus aiheuttaa rakennuksen sisä- ja ulkoilman välille korkeudesta riippuvan ilman paine-erojakauman. Kun ulkoilma on sisäilmaa kylmempi, rakennuksen sisällä lattia-rajassa ilmanpaine on pienempi kuin ulkona vastaavalla korkeudella kun muut ilmiöt eivät vaikuta. Eli tällöin savupiippuvaikutus aiheuttaa rakennuksen sisälle lattia-rajassa alipaineen. Tämän vaikutuksesta ilma pyrkii virtaamaan ulkoa sisälle rakennuksen lattia-rajassa vaipan epätiivetyyskohdista savupiippuvaikutuksen takia. Ylöspäin noustessa ilmanpaine-ero sisä- ja ulkoilman välillä pienenee ja pienenee nollaan jollain korkeudella. Tätä korkeutta, jossa ilmanpaine-ero sisä- ja ulkoilman välillä on nolla, kutsutaan neutraalitasoksi tai neutraaliakseliksi. Neutraalitas- tason yläpuolella sisäilman paine on suurempi kuin ulkoilman paine, eli neutraali-

son yläpuolella sisäpuolella on ylipaine. Savupiippuvaikutuksen korkeudesta riippuva paine-erojakauma voi olla myös toisin päin, jos sisällä on kylmempää kuin ulkona.



**Kuva V.6.4.** Savupiippuvaikutuksen aiheuttama paine-eron muodostuu savupiippuvaikutuksesta tasatiiviissä rakennuksessa kuvan mukaisesti, kun sisällä on ulkoilmaa lämpimämpää ilmaa.

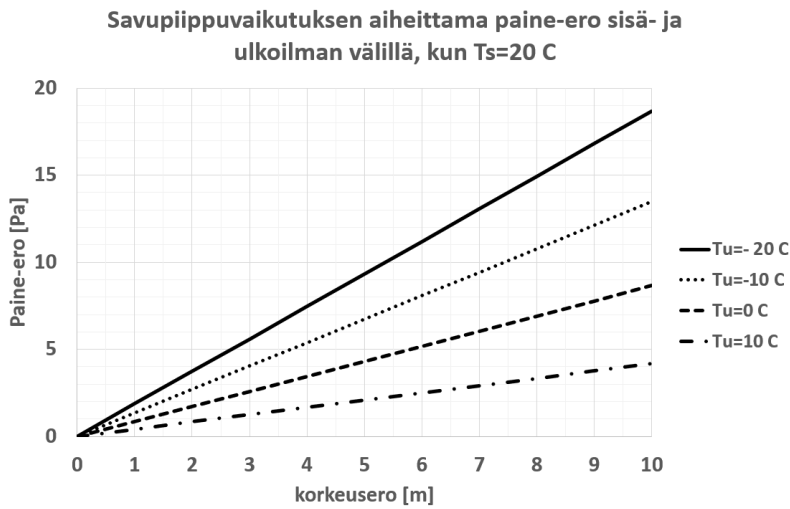
Savupiippuvaikutus on sitä suurempi, mitä suurempi on lämpötilaero sisä- ja ulkoilman välillä ja mitä suurempi on tilan korkeus. Kerrostalojen porraskäytävässä savupiippuvaikutuksen suuruus on talvella hyvin iso. Se voi aiheuttaa porraskäytävän alaovelle niin ison alipaineen, että se vaikeuttaa ulko-oven avaamista.

Savupiippuvaikutuksen aiheuttama paine-eron suuruus voidaan laskea likimääräisesti seuraavalla kaavalla, joka perustuu myöhemmin esitettyyn tarkempaan kaavaan V.6.4.

$$\Delta p = 0,043 \cdot z \cdot \Delta T \quad (\text{Kaava V.6.1})$$

jossa  $\Delta p$  on sisä- ja ulkoilman välinen ilmanpaine-ero (Pa)  
 $z$  etäisyys neutraalitasosta (m)  
 $\Delta T$  sisä- ja ulkoilman välinen lämpötilaero

Seuraavan kuvan avulla voi määrittää savupiippuvaikutuksen aiheuttaman paine-eron suuruus asuinrakennuksessa, kun tiedetään etäisyys neutraaliakselista ja ulkoilman lämpötila.



**Kuva V.6.5.** Savupiippuvaikutuksen aiheuttaman paine-eron suuruus asuinrakennuksessa riippuen ulkoilman lämpötilasta ja korkeuserosta neutraaliakselilta.

## Savupiippuvaikutus fysikaalisena ilmiönä

Savupiippuvaikutukseen vaikuttaa ilman lämpötilaeroista johtuvat ilman tiheyksien erot, painovoima ja korkeuserot. Fysikaalinen ilmiö tämän takana on hydrostaattinen paine. Hydrostaattinen paine on neste- tai kaasukerroksen aiheuttama paine maanvetovoimakentässä. Hydrostaattisen paineen kaava on:

$$p = \rho \cdot g \cdot h \quad (\text{Kaava V.6.2})$$

jossa  $p$  on neste- tai kaasukerroksen aiheuttama paine  
 $\rho$  aineen tiheys  
 $g$  maan vetovoiman putoamiskiihtyvyys  
 $h$  ainekerroksen korkeus

Savupiippuvaikutuksen aiheuttama paine-ero aiheutuu ilman tiheyseroista. Laskentakaava on

$$\Delta p = g \cdot z \cdot (\rho_1 - \rho_2) \quad (\text{Kaava V.6.3})$$

jossa  $\Delta p$  on savupiippuvaikutuksen aiheuttama paine-ero  
 $g$  maan vetovoiman putoamiskiihtyvyys  
 $z$  etäisyys neutraalitasosta  
 $\rho_1$  ilman tiheys tarkasteltavassa ilmatilassa  
 $\rho_2$  ilman tiheys tarkasteltavan ilmatilan ympärillä

Savupiippuvaikutuksen laskentakaava V.6.3 saadaan johdettua muotoon, joka on vain lämpötiloista ja korkeuserosta riippuva. Tämä voidaan tehdä kun, yhdistetään kaava V.5.3 kaavaan V.6.2.

$$\Delta p = 3463 \frac{\text{Pa}\cdot\text{K}}{\text{m}} \cdot z \cdot \left( \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) \quad (\text{Kaava V.6.4})$$

jossa  $\Delta p$  on savupiippuvaikutuksen aiheuttama paine-ero  
 $z$  etäisyys neutraalitasosta

(alaspäin positiivinen suunta)

$T_1$  ilman lämpötila tarkasteltavassa ilmatilassa

$T_2$  ilman lämpötila tarkasteltavan ilmatilan ympärillä

### Tehtävä V.6.1

Määritä mikä on savupiippuvaikutuksesta aiheutunut paine-ero sisä- ja ulkoilman välillä alakerran lattianrajassa kaksikerroksisessa omakotitalossa, joka on avointa ilmatilaa. Yläkerroksen ikkuna- on auki, jolloin neutraaliakseli on neljän metrin korkeudella lattian rajasta. Ulkoilman lämpötila tarkasteluhetkellä on -20 C.

#### Tehtävä V.6.1 ratkaisu

Rakennuksen sisälämpötila oletetaan olevan 20 C, ulkolämpötila -20 C ja neutraaliakselin etäisyys lattianrajasta on  $z = +4$  metriä. Vastaus voidaan löytää likimääräisesti kuvasta V.6.5 tai tarkasti laskenta-kaavalla V.6.4.

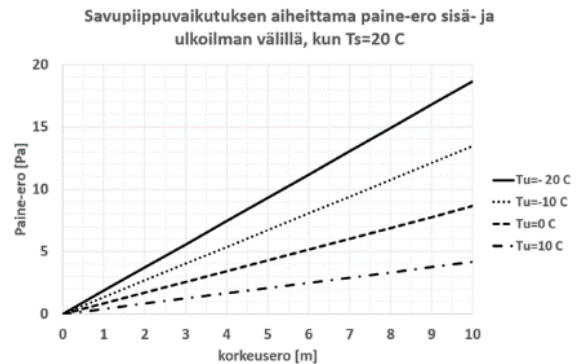
Likimääräisesti paine-ero on 7,5 Pa

Kaavan V.6.4 perusteella paine-ero on

$$\Delta p = 3463 \frac{\text{Pa}\cdot\text{K}}{\text{m}} \cdot z \cdot \left( \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) = 3463 \frac{\text{Pa}\cdot\text{K}}{\text{m}} \cdot 4\text{m} \cdot \left( \frac{1}{293,15\text{K}} - \frac{1}{253,15\text{K}} \right) = -7,466\text{Pa}$$

Tuloksena saadaan siis alipaine (negatiivinen) ulkoilmaan nähden.

Jos paine-eroa laskettaisiin em. tehtävässä neutraalitasoin yläpuolella, on etäisyys  $z$  negatiivinen. Tällöin tuloksena saadaan positiivinen paine-ero, eli kyseessä on ylipaine ulkoilmaan nähden. Kun paine-ero määritellään kuvan V.6.5 tai kaavan V.6.1 perusteella tulee huomioida, ollaanko neutraaliakselin ala vai yläpuolella. Sen perusteella määritellään, onko kyseessä alipaine vai ylipaine ulkoilmaan nähden.





## V.6.2 Tuulen aiheuttama paine

Tuuli aiheuttaa rakennuksen tuulenpuolelle ylipainetta ja tuulen vastaiselle puolelle alipainetta. Tämän vaikutuksesta tuuli aiheuttaa myös rakennuksen sisä- ja ulkoilman välille ilman paine-eroa. Tuulen aiheuttama paine-ero on sitä suurempi mitä suurempi on rakennukseen kohdistuva tuulen nopeus. Tuulen aiheuttamaan paineeseen vaikuttaa myös tuulen suunta ja rakennuksen geometria. Tuulen suunnan ja rakennuksen geometrian vaikutus ilmaistaan tuulen muotokerroimien avulla. Tuulen aiheuttama paine voidaan laskea kaavalla.

$$\Delta p = \mu \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2} \quad (\text{Kaava V.6.5})$$

jossa	$\Delta p$	on	tuulen aiheuttama paine-ero rakennuksen ulkopuolelle
	$\mu$		tuulen muotokerroin
	$\rho$		ilman tiheys
	$v$		tuulen nopeus

## Tuulen aiheuttama paine fysikaalisena ilmiönä

Ilmassa energia voi esiintyä monessa eri muodossa. Ilmassa oleva energia voi esiintyä mm. dynaamisena energiana tai potentiaalienergiana. dynaaminen energia liittyy ilman liike-energiaan. Ilmassa potentiaalienergiaan liittyy ilman paineet ja paine-erot. Ilman liike-energia voidaan ilmoittaa myös dynaamisena paineena. Tämä perustuu virtaaville aineille pätevään Bernoullin lakiin eli virtaavan aineen energiansäilymläkiin.

$$p = \frac{\rho \cdot v^2}{2} \quad (\text{Kaava V.6.6})$$

jossa  $p$  on dynaaminen paine  
 $\rho$  virtaavan aineen tiheys  
 $v$  virtaavan aineen nopeus

Tuulen muotokerroin määräytyy tuulen suunnan ja geometrian mukaan. Nämä on usein määritetty kokeellisesti tuulitunnelikokeiden perusteella. Tuulen muotokertoimeen vaikuttaa virtausnopeudet kyseisen kohdan lähistöllä tai ympärillä. Esimerkiksi jos tuuli kohdistuu kohtisuoraan rakennuksen seinään, kyseisen seinän keskialueella on ns. patopiste, jossa virtaus pysähtyy. Tässä kohdassa tuulen aiheuttama paine on suurimmillaan. Tuulen puolen etureunan takana sitten taas voi olla voimakas alipaine, koska kyseisen kohdan ympärillä on pinnasta poispäin kohdistuvia virtauksia. Tuulen muotokerroin tuulen puolella on 0,7-0,8 ja tuulen vastaisella puolella -0,3 – (-0,7) (Ympäristöopas 2016, s.119).

### Tehtävä V.6.2

Varastorakennukseen kohdistuvan tuulen nopeus 10 metrin korkeudella on 10 m/s. Rakennuksen sisäilman lämpötila on sama kuin ulkoilman lämpötila. Kuinka suuri on paine-ero rakennuksen tuulenpuoleisella seinällä. Rakennuksen sisätilan tuulenpaineen muotokerroin on -0,2. Tuulen puoleisella seinällä tuulenpaineen muotokerroin on 0,7.

#### Tehtävä V.6.2 ratkaisu

Tuulesta johtuva paine-ero lasketaan kaavalla V.6.5. Tuulen puoleisen seinällä tuulen muotokerroin on 0,7, jolloin tuuli aiheuttaa tuulen puolelle paine-eron normaali-ilmanpaineeseen nähden.

$$\Delta p = \mu \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2} = 0,7 \cdot \frac{1,2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot \left(10 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2}{2} = 42 \text{Pa}$$

Sisällä paine-ero tuulen vaikutuksesta normaalipaineeseen nähden on

$$\Delta p = \mu \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2} = -0,2 \cdot \frac{1,2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \left(10 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2}{2} = -12 \text{Pa}$$

jolloin paine-ero seinän yli tuulenpuolella on  $42 - (-12) = 54 \text{Pa}$ .

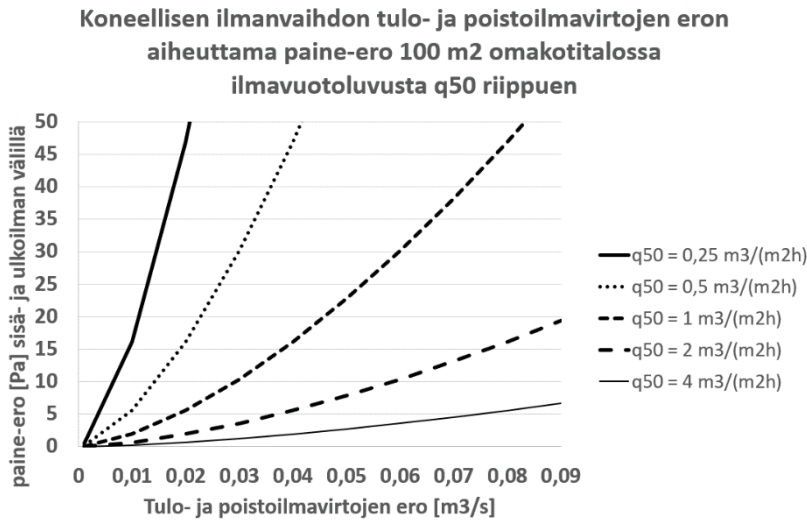
## V.6.3 Koneellisen ilmanvaihdon aiheuttama paine-ero

Rakennuksen painesuhteisiin voi vaikuttaa myös koneellinen ilmanvaihto. Koneellisen ilmanvaihdon koneita ovat poistoilmapuhallin, koneellinen tulo-poisto ilmanvaihtokone ja muut laitteet, jotka siirtävät ilmaa rakennuksen vaipan läpi, esimerkiksi liesituuletin tai keskuspölynimuri. Paine-eron suuruuteen vaikuttaa koneellisesti siirrettyjen ilmavirtojen suuruudet ja rakennuksen vaipan ilmanpitävyys. Rakennuksen vaipan ilmanpitävyys voidaan määrittää kokeellisesti.

Koneellisesti rakennuksen vaipan läpi siirrettävän ilmavirtojen nettoeroon voidaan vaikuttaa ilmanvaihtojärjestelmän suunnittelulla ja järjestelmän käytön aikaisella säädöllä. Vaikka rakennuksessa olisi tulo-poisto ilmanvaihtojärjestelmä ilmanvaihtoa on haastava pitää jatkuvasti tasapainossa kaikissa käyttötilanteissa. Koneellisen poistoilmanvaihtojärjestelmän tapauksessa rakennukseen muodostetaan tarkoituksella alipaine, jotta korvausilmaa saataisiin ulkoa sisälle tätä varten rakennuksen vaippaan tehdyistä korvausilmaventtiileistä.

Rakennuksen vaipan ilmanpitävyys tehdään usein tarkoituksella mahdollisimman tiiviiksi, jotta minimoidaan hallitsemattomat vaipan läpi siirtyvät ilmavirrat rakennuksen energiatehokkuuden näkökulmasta.

Rakennuksen koneellisen ilmanvaihdon aiheuttaman paine-eron suuruus määräytyy ilmavirtojen eron ja rakennuksen ilmatiiveyden perusteella. Rakennuksen vaipan ilmatiiveys määritetään usein ovipuhaltimella tehdyllä painekokeella, jolloin määritetään vaipan läpi siirtyvä vuotoilmavirta paine-eron suuruudesta riippuen. Vaipan ilmanpitävyyden tunnuslukuna ilmoitetaan vuotoilmavirta keskimäärin yhtä vaipan neliometriä kohden, kun ilmanpaine-ero on 50 Pascalia. Tämä tunnusluku on ilmavuotoluku q50. Esimerkkinä alla on esitetty kuvaaja 100 m<sup>2</sup> yksikerroksisen omakotitalon koneellisen ilmanvaihdon aiheuttamasta alipaineen suuruudesta rakennuksen vaipan tiiveyttä kuvaavan ilmavuotoluvun q50 ja ilmanvaihdon tulo- ja poistoilmavirtojen eron ollessa muuttujina.



**Kuva V.6.6.** Koneellisen ilmanvaihdon aiheuttama paine-eron suuruus rakennuksen tiiveyden ja ilmanvaihdon tasapainotuksen erosta riippuen.

Kun savupiippuvaikutus tai tuuli ei vaikuta, vuotoilmamäärä rakennuksen vaipan läpi on sama kuin koneellisen ilmanvaihdon tulo- ja poistoilmavirtojen erotus. Vuotoilmavirran, vaipan pinta-alan ja kokeellisesti määritetyn ilmavuotoluvun q<sub>50</sub> perusteella voidaan määrittää paine-ero. Tämä voidaan laskea seuraavalla kaavalla.

$$\Delta p = 50Pa \cdot \frac{q_v \frac{1}{\beta}}{A \cdot q_{50}} \quad (\text{Kaava V.6.7.})$$

jossa	$\Delta p$	on	koneellisen ilmanvaihdon aiheuttama paine-ero
	$q_v$		koneellisen ilmanvaihdon tulo- ja poistojen ero [m <sup>3</sup> /s]
	$A$		rakennuksen vaipan pinta-ala
	$q_{50}$		rakennuksen ilmavuotoluku yksikössä [m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> h]
	$\beta$		kokeellisesti määritetty vakio yleensä 0,6-0,7

Vuotoilmavirran suuruus pienenee mitä paremmin koneellinen ilmanvaihto saadaan tasapainotettua. Paine-erosta riippuva vuotoilmavirta voidaan laskea kaavalla:

$$q_{vuoto} = A \cdot q_{50} \cdot \left( \frac{\Delta p}{50Pa} \right)^\beta \quad (\text{Kaava V.6.8})$$

jossa	$q_{vuoto}$		vuotoilman tilavuusvirta
	$A$		rakennuksen vaipan pinta-ala
	$q_{50}$		rakennuksen ilmavuotoluku yksikössä [m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> h]
	$\Delta p$	on	koneellisen ilmanvaihdon aiheuttama paine-ero
	$\beta$		kokeellisesti määritetty vakio yleensä 0,6-0,7

### Tehtävä V.6.3

Rakennuksen ilmavuotoluku on 0,6. Mikä on 100m<sup>2</sup> yksikerroksisen omakotitaloon ilmanvaihdon aiheuttama paine-ero, jos tulo- poisto ilmanvaihtokoneen tulo- ja poistoilmavirran ero on 20 l/s. Rakennuksen vaipan ala on 300 m<sup>2</sup>. kerroin  $\beta$  on 0,65

#### Tehtävän V.6.3 ratkaisu

Muodostunutta paine-eroa voidaan arvioida kuvan V.6.6 perusteella tai laskea kaavalla V.6.7.

Kuvan V.6.6 perusteella muodostuva paine-ero on 10-15 Pascalin välillä.

Muodostunut paine-ero voidaan laskea kaavalla V.6.7. vuotoilmavirta yksikössä m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>s on 0,6\*3600=0.000167 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>s

$$\Delta p = 50Pa \cdot \left( \frac{q_v}{A \cdot q_{50}} \right)^{\frac{1}{\beta}} = 50Pa \cdot \left( \frac{0,020 \frac{m^3}{s}}{300m^2 \cdot 0,000167 \frac{m^3}{m^2 \cdot s}} \right)^{\frac{1}{0,65}} = 12,2Pa$$

Jos ilmanvaihtokoneen poistoilmavirta on suurempi kuin tuloilmavirta, on saatu tulos rakennuksessa vaikuttava alipaine ulkoilmaan nähden.

Erityissuunnittelijan on suunniteltava rakennuksen ulko- ja ulospuhallusilmavirrat siten, ettei rakenteisiin aiheudu ylipaineen vuoksi rakenteita vaurioittavaa pitkäaikaista kosteusrasitusta eikä alipaineen vuoksi epäpuhtauksien siirtymistä sisäilmaan. Pääsuunnittelijan, erityissuunnittelijan ja rakennussuunnittelijan on tehtäviensä mukaisesti suunniteltava rakennuksen vaipan ja sisärakenteiden ilmanpitävyys ja hormivaikutuksen hallinta siten, että edellytykset ilmanvaihdon toiminnalle voidaan varmistaa ja vältetään rakenteissa olevien epäpuhtauksien, maaperässä olevien epäpuhtauksien ja radonin siirtymistä sisäilmaan ja vältetään kosteuden siirtymistä rakenteisiin. (YM 1009/2017)

## V.7 Rakennuksen virtaustekniset ominaisuudet

Rakennuksen virtausteknisenä ominaisuutena tärkein on rakennuksen ilmanvuotoluku  $q_{50}$ , joka kuvaa rakennuksen vaipan keskimääräistä vuotoilman tilavuusvirtaa yhtä neliometriä kohden, kun paine-ero sisä- ja ulkoilman välillä on 50 Pa. Ympäristöministeriön rakentamista koskevien asetuksissa on vaatimuksia rakennuksen vaipan tiiveydelle eri näkökulmista. Rakennuksen kosteusteknisen toimivuuden (782/2017) näkökulmasta rakennuksen vaipan tiiveys tulee olla sillä tasolla, jolla haitallinen kosteuden kertyminen rakenteisiin saadaan estettyä. Rakennuksen sisäilman laadun kannalta rakennuksen ilmanpitävyys tulee olla sillä tasolla, että epäpuhtauksien siirtyminen (1009/2017) sisäilmaan saadaan estettyä. Uudisrakentamisen energiatehokkuutta koskevassa asetuksessa (1010/2017) rakennuksen vaipan ilmanvuotoluvun tulee olla vähintään  $4 \frac{m^3}{m^2 \cdot h}$ , jollei rakennuksen käytän edellyttämät rakenteet edellytä suurempaa arvoa.

Rakennuksen teknisten vaatimusten pitkäaikainen täytyminen edellyttää usein painesuhteiden hallintaa. Rakennuksen vaipan ilmanvuotoluku ja ilmanvaihtoalueiden välisen rakenteiden ilmanpitävyys vaikuttaa rakennuksen painesuhteiden ja ilmavirtojen hallintaan.

Rakennuksen ilmavuotoluvun mittaus tehdään standardin SFS-EN 13829 mukaisella menetelmällä. Ilmanvuotoluvun mittauksen yhteydessä määritetään usein myös vaipan paine-erosta riippuva vuotoilman suuruus, joko kuvaajana tai vuotofunktiona.

Rakennuksen ilmatiiveyden suurimpia puutteita ulkovaipassa voidaan kartoittaa lämpökuvauksin ja sisärakenteissa ja pienempiä puutteita merkkiainetutkimuksin.

Tuuletusrakojen virtausominaisuudet esitetään usein suunnitteluohjeissa vain tarvittavan aukkopinta-alan avulla. Korvausilmaventtiilien ja siirtoilmaventtiilien ominaisuuksia voidaan myös esittää kuvaajan tai funktion avulla.

## V.8 Aineen virtausten laskennallinen tarkastelu

Virtaustehtävissä laskettavana suureena on joko virtausnopeus, virtauksen tilavuusvirta tai paine-ero. Tyypillisiä virtaustehtäviä on virtausten laskenta tuuletusväliässä, vuotoilmavirran laskennallinen tarkastelu tai sisä- ja ulkoilman välisen paine-eron laskennallinen tarkastelu. Usein tulee myös tarkastaa, onko virtaus laminaarista vai turbulენტista. Virtausten laskenta monimutkaisissa geometrioissa tai turbulენტisen tapauksessa edellyttää usein numeeristen virtauslaskentaohjelmien käyttöä. Yksinkertaisiin geometrioihin löytyy usein kokeellisesti määriteltäviä laskentakaavoja. Teoreettisesti johdettuja laskentakaavoja löytyy vain eräisiin geometrialtaan hyvin yksinkertaisiin ja laminaarisen virtauksen tapauksiin. Tässä esitetyt virtauslaskenta-tehtävät ovat pääasiassa ilman virtauksen laskentaan, mutta osaa kaavoista voidaan käyttää myös veden virtauksen laskentaan. Esitetyt kaavat soveltuvat putki- tai rakovirtausten, huokoisten materiaalien läpi tapahtuvan virtauksen ja kouruvirtausten laskentaan.

### V.8.1 Ilman virtaus raossa tai putkessa

Raon läpi virtaama ilmavirtauksen eteenpäin ajavana voimana on ilmanpaine-ero. Ilman virratessa virtausta vastustaa kitka- ja kertahäviöt. Mitä kapeampi ja pidempi rako on, sitä suurempi on kitkahäviön osuus.

Kitka virtauksessa koostuu leikkausjännityksestä virtauksen reunalla. Virtauksen reunalla leikkausjännitykseen vaikuttaa virtaavan aineen dynaaminen viskositeetti ja virtausnopeuden muutos reunalla kohtisuoraan reunalta virtauksen poikki.

$$\tau = \eta \cdot \frac{dv}{dx} \quad (\text{Kaava V.8.1})$$

jossa  $\tau$  on leikkausjännitys virtauksen reunalla  
 $\eta$  on virtaavan aineen dynaaminen viskositeetti  
 $\frac{dv}{dx}$  virtausnopeuden muutos reunalla kohtisuoraan reunalta

## Kitkahäviö laminaarisessa virtauksessa

Kun on tiedossa, että laminaarisessa virtauksessa virtausnopeusjakauma on oheisen kuvan mukaisesti parabolinen, leikkausjännityksen suuruus rakovirtauksen reunalla on

$$\tau = \frac{\eta \cdot 12 \cdot v}{h} \quad (\text{Kaava V.8.2})$$

jossa  $\tau$  on leikkausjännitys virtauksen reunalla  
 $\eta$  on virtaavan aineen dynaaminen viskositeetti  
 $v$  on virtausnopeus keskimäärin raossa  
 $h$  on raon poikkileikkauksen leveys

Rakovirtauksessa virtauksen ollessa laminaarista painehäviö saadaan laskettua seuraavan kaavan V.8.3 (Poiseullen kaavan) mukaan. Kaavan mukaisesti laminaarisen virtauksen paine-ero kasvaa lineaarisesti virtausnopeuden kasvaessa.

$$dp = \frac{\eta \cdot 12 \cdot L \cdot v}{h^2} \quad (\text{Kaava V.8.3})$$

jossa  $dp$  on painehäviö raon päiden välillä  
 $\eta$  on virtaavan aineen dynaaminen viskositeetti  
 $L$  on virtausmatka raossa  
 $v$  on virtausnopeus keskimäärin raossa  
 $h$  on raon poikkileikkauksen leveys

Laminaarisessa putkivirtauksessa painehäviö saadaan seuraavalla kaavalla

$$dp = \frac{\eta \cdot 64 \cdot L \cdot v}{D^2} \quad (\text{Kaava V.8.4})$$

jossa  $D$  on putken halkaisija  
 $v$  on virtausnopeus keskimäärin putkessa

### Tehtävä V.8.1

Elementtikerrostalon ulkonurkkaan on jäänyt 1,5 mm leveä rako sisäkuoreen, jonka paksuus on 150 mm koko kerroskorkeudelle 2,6m. Laske mikä on ilmapinnan tilavuusvirran suuruus raosta, jos sisäilman ja betonielementin sisäkuoren ulkopinnan välinen ilmanpaine-ero on 15 Pa. (Virtaus on laminaarista, ota vain kitkahäviö huomioon. Virtausmatka raossa 150 mm, raon paksuus 1,5 mm ja raon pituus 2,6 m)



## Tehtävän V.8.1 ratkaisu

Kyseessä on rakovirtaus, jossa virtausreititin pituus on 150 mm, leveys 2,6 metriä ja raon paksuus 1,5 mm. Paine-ero on 15 Pa.

Oletetaan ensin, että virtaus on laminaarista, ja käytetään laminaarisen rakovirtauksen kaavaa keskimääräisen virtausnopeuden laskemiseen. Tämän jälkeen tarkastetaan, onko virtaus laminaarista. Sitten kun on virtausnopeuden suuruus varmistettu, lasketaan tilavuusvirran suuruus kertomalla keskimääräinen virtausnopeus raon poikkileikkauksen pinta-alalla.

Laminaarisen virtauksen laskentakaava rakovirtaukselle (Poiseullen kaava)

$$dp = \frac{\eta \cdot 12 \cdot L \cdot v}{h^2}$$

jossa  $dp$  on painehäviö raon päiden välillä  $dp = 15Pa$   
 $\eta$  on virtaavan aineen dynaaminen viskositeetti  $\eta = 17,4 \cdot 10^{-6} \cdot Pa \cdot s$   
 $L$  on virtausmatka raossa  $L = 0,150m$   
 $v$  on virtausnopeus keskimäärin raossa  
 $h$  on raon poikkileikkauksen leveys  $h = 0,0015m$

Ratkaistaan kaavasta virtausnopeus ja sijoitetaan siihen lähtötiedot

$$v = \frac{dp \cdot h^2}{\eta \cdot 12 \cdot L} = \frac{15Pa \cdot (0,0015m)^2}{17,4 \cdot 10^{-6} \cdot Pa \cdot s \cdot 12 \cdot 0,15m} = 1,078 \frac{m}{s}$$

Tarkastetaan vielä, onko virtaus turbulენტtista laskemalla Reynoldsin luku ja vertaamalla sitä raja-arvoon 2500.

$$Re = \frac{d_h \cdot v \cdot \rho}{\eta}$$

jossa  $d_h$  on hydraulinen halkaisija, joka on rakovirtauksen tapauksessa  $2 \cdot h$   
 $\rho$  on virtaavan aineen tiheys  $\rho = 1,2 \frac{kg}{m^3}$

$$Re = \frac{2 \cdot h \cdot v \cdot \rho}{\mu} = \frac{2 \cdot 0,0015m \cdot 1,078 \frac{m}{s} \cdot 1,2 \frac{kg}{m^3}}{17,4 \cdot 10^{-6} \cdot Pa \cdot s} = 223$$

$Re < 2500 \rightarrow$  Virtaus on laminaarista

Virtauksen tilavuusvirtaus on virtauksen keskimääräinen nopeus kerrottuna raon poikkileikkauuspinta-alan.

$$q_v = b \cdot h \cdot v$$

jossa  $q_v$  on virtauksen tilavuusvirta  
 $b$  raon poikkileikkauksen korkeus  $b = 2,6m$   
 $h$  raon poikkileikkauksen paksuus  $h = 0,0015m$

$$q_v = b \cdot h \cdot v = 2,6m \cdot 0,0015m \cdot 1,078 \frac{m}{s} = 0,0042 \frac{m^3}{s} = 4,2 \frac{litraa}{s}$$

### Kitkahäviö turbulenttisen virtauksessa

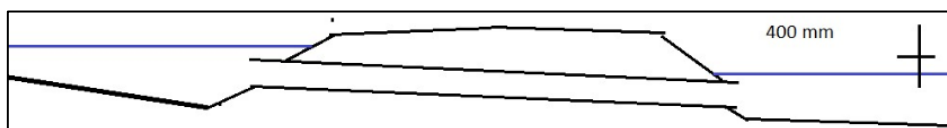
Virtauksen ollessa turbulenttista sileässä putkessa painehäviö voidaan laskea kaavan V.8.5 mukaan. Kaavaa voidaan käyttää myös rakovirtaukseen, kun hydraulisen halkaisijan arvona käytetään raon poikkileikkauksleveyttä kerrottuna kahdella.

$$dp = \frac{0,079}{\left(\frac{d_h v \rho}{\eta}\right)^{\frac{1}{4}}} \cdot \frac{L}{d_h} \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2} \quad (\text{Kaava V.8.5})$$

jossa  $dp$  on painehäviö raon päiden välillä  
 $\eta$  on virtaavan aineen dynaaminen viskositeetti  
 $L$  on virtausmatka raossa  
 $v$  on virtausnopeus keskimäärin raossa  
 $d_h$  on virtauksen hydraulinen halkaisija (rako  $d_h = 2 \cdot h$ )  
 $\rho$  on virtaavan aineen tiheys

### Tehtävä V.8.2

Virtaus 20 metriä pitkässä ojarummussa. rummun halkaisija on 600 mm. mikä on veden tilavuusvirta putkessa, kun vesipinnan korkeusero putken päiden välillä on 400 mm.



## Tehtävän V.8.2 ratkaisu

Nestepinnan tasojen ero aiheuttaa paine-eron putken päiden välille hydrostaattisesta paineesta. 400 mm vesipatsaan aiheuttama paine voidaan laskea kaavalla.

$$p = \rho \cdot g \cdot h$$

jossa  $p$  on vesipatsaan alle aiheutunut paine

$$\rho \quad \text{on veden tiheys} \quad \rho = 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$g \quad \text{maan vetovoiman kiihtyvyys} \quad g = 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$h \quad \text{on ainepatsaan korkeus} \quad h = 0,4 \text{ m}$$

$$p = \rho \cdot g \cdot h = 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 0,4 \text{ m} = 3924 \text{ Pa}$$

Oletetaan virtauksen olevan turbulenttista, jolloin paine-eron laskentaan käytetään kaavaa

$$dp = \frac{0,079}{\left(\frac{d_h \cdot v \cdot \rho}{\eta}\right)^{\frac{1}{4}}} \cdot \frac{L}{d_h} \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2}$$

jossa  $dp$  on painehäviö raon päiden välillä  $dp = 3924 \text{ Pa}$

$$\eta \quad \text{on veden dynaaminen viskositeetti} \quad \eta = 1002 \cdot 10^{-6} \cdot \text{Pa} \cdot \text{s}$$

$$L \quad \text{on virtausmatka raossa} \quad L = 20 \text{ m}$$

$v$  on virtausnopeus keskimäärin raossa

$$d_h \quad \text{on virtauksen hydraulinen halkaisija} \quad d_h = 0,6 \text{ m}$$

$$\rho \quad \text{on virtaavan aineen tiheys} \quad \rho = 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Ratkaistaan virtausnopeus yhtälöstä, jolla paine-eroksi saadaan 3924 Pa haaru-koimalla Excelissä.

v	dp
5	790,92542
10	2660,3454
12	3660,2033
13	4210,5506
12,5	3931,249
12,45	3903,7715
12,487	3924,0969

Virtausnopeudeksi saadaan 12,487 m/s. Tarkastetaan että virtaus on turbulenttista laskemalla Reynoldsin luku ja vertaamalla sitä raja-arvoon 2500.

$$Re = \frac{d_h \cdot v \cdot \rho}{\eta}$$

jossa  $d_h$  on hydraulinen halkaisija  $d_h = 0,6m$   
 $\rho$  on virtaavan aineen tiheys  $\rho = 1000 \frac{kg}{m^3}$

$$Re = \frac{d_h \cdot v \cdot \rho}{\eta} = \frac{0,6m \cdot 12,487 \frac{m}{s} \cdot 1000 \frac{kg}{m^3}}{1002 \cdot 10^{-6} \cdot Pa \cdot s} = 7477246$$

Virtaus on turbulenttista

Tilavuusvirta lasketaan kertomalla virtausnopeus poikkileikkauksen pinta-alalla

$$q_v = \pi \cdot \left(\frac{d}{s}\right)^2 \cdot v = \pi \cdot (0,3m)^2 \cdot 12,487 \frac{m}{s} = 3,53 \frac{m^3}{s}$$

## Kertahäviöt virtauksessa

Virtaukseen tulee aina kertahäviöt, joka koostuu sisään- ja ulosvirtauksesta. Jos kysymyksessä on lyhyt putki, joka tässä tapauksessa on aukko, painehäviö koostuu vain kertahäviöstä. Sisään ja ulosvirtausten kertahäviöiden summa voidaan laskea seuraavalla kaavalla.

$$dp = 1,8 \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2} \quad (\text{Kaava V.8.6})$$

jossa  $dp$  on sisään- ja ulosvirtauksen painehäviö  
 $v$  on virtausnopeus keskimäärin raossa  
 $\rho$  on virtaavan aineen tiheys

### Tehtävä V.8.3

Seinässä on raitisilmaventtiili. Laske mikä on raitisilmaventtiilistä tuleva ilman tilavuusvirta! Raitisilmaventtiili vastaa aukkoa, jonka pinta-ala on  $0,005 \text{ m}^2$ . Paine-ero  $15 \text{ Pa}$ . (oleta vain kertahäviö huomioon, kertahäviökertoimen suuruus on  $1,8$ )

#### Tehtävän V.8.3 ratkaisu

Virtausnopeus voidaan laskea aukon kertahäviökaavasta.

$$v = \sqrt{\frac{dp}{0,9 \cdot \rho}}$$

jossa  $dp$  on paine-ero  $dp = 15 \text{ Pa}$   
 $\rho$  on ilman tiheys  $\rho = 1,2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

Sijoittamalla lähtötiedot kaavaan saadaan keskimääräinen virtausnopeus

$$v = \sqrt{\frac{dp}{0,9 \cdot \rho}} = \sqrt{\frac{15 \text{ Pa}}{0,9 \cdot 1,2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}} = 3,72 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Tilavuusvirta saadaan kertomalla säleikön virtausominaisuuksia vastaavan aukon pinta-ala.

$$q_v = A \cdot v = 0,005 \text{ m}^2 \cdot 3,72 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 0,0186 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = 18,6 \frac{\text{litraa}}{\text{s}}$$

## V.8.2 Ilman virtaus huokoisen aineen läpi

Ilman virtausreitteinä voi olla myös huokoinen aine. Virtaus huokoisen aineen läpi edellyttää materiaalille määritetyn ilmanläpäisevyyssarvon tai läpäisevyyssarvon tietämistä. Rakennusmateriaaleille on määritelty ilman läpäisevyyksiä. Ilman virtaus huokoisen aineen läpi lasketaan seuraavalla kaavalla (Darcyn laki).

$$v = \frac{k_a \cdot \Delta p}{L} \quad (\text{V.8.7})$$

jossa	$v$	on virtausnopeus huokoisen aineen läpi
	$k_a$	materiaalin ilmanläpäisevyys
	$\Delta p$	ilman paine-ero materiaalikerron yli
	$L$	on virtausmatka eli materiaalikerroksen paksuus

Huokoisen tai rakeisen materiaalin läpi tapahtuvan virtauksen laskentaan käytettävää kaavaa V.8.7 voidaan myös yleistää huomioiden virtaavan aineen viskositeetti, kun kaava esitetään muodossa.

$$v = \frac{k \cdot \Delta p}{\eta \cdot L} \quad (\text{V.8.8})$$

jossa	$v$	on virtausnopeus huokoisen aineen läpi
	$k$	materiaalin läpäisevyys
	$\Delta p$	ilman paine-ero materiaalikerron yli
	$\eta$	virtaavan materiaalin dynaaminen viskositeetti
	$L$	on virtausmatka eli materiaalikerroksen paksuus

Materiaalikerroksille ilmanläpäisevyyttä kuvaava materiaaliominaisuudet voidaan esittää myös ilmanläpäisyvastuksen  $W$  tai ilmanläpäisevyysskerroimen  $K$  muodossa. Tällöin kaava V.8.7 esitetään seuraavissa muodoissa.

$$v = K \cdot \Delta p \quad (\text{V.8.9})$$

jossa	$v$	on virtausnopeus huokoisen aineen läpi
	$K$	materiaalikerroksen ilmanläpäisevyysskerroin
	$\Delta p$	ilman paine-ero materiaalikerron yli

tai

$$v = \frac{\Delta p}{W} \quad (\text{V.8.10})$$

jossa	$v$	on virtausnopeus huokoisen aineen läpi
	$\Delta p$	ilman paine-ero materiaalikerron yli
	$W$	materiaalikerroksen ilmanläpäisyvastus

Kosteusosiossa K esitetyn taulukon mukaan parametrille W käytetään myös merkintää  $S_a$  ja parametrille K merkintää  $K_a$ . Materiaalin läpäisevyydelle k käytetään kirjallisuudessa myös merkintää  $B_0$ .

### Tehtävä V.8.4

Tuulensuojalevyllä suoritustasoilmoituksessa esitetty ilmanläpäisevyyskerroin K on  $2,5 \cdot 10^{-6} \frac{m^3}{m^2 \cdot s \cdot Pa}$ . Mikä olisi rakennuksen ilmavuotoluku  $q_{50}$  jos rakennuksen ilmatiiveys olisi vain tuulensuojalevyn varassa.

#### Tehtävän V.8.4 ratkaisu

Rakennuksen ilmavuotoluku kuvaa millä tilavuusvirralla ilmaa virtaa rakennuksen vaipan neliön alan läpi keskimäärin, kun paine-ero sisä- ja ulkoilman välillä on 50 Pa. Lasketaan tuulensuojalevyn läpi virtaava ilman tilavuusvirran suuruus neliötä kohden (eli ilman virtausnopeus) kun paine-ero on 50 Pa.

$$v = K \cdot \Delta p = 2,5 \cdot 10^{-6} \frac{m^3}{m^2 \cdot s \cdot Pa} \cdot 50 Pa = 0,000125 \frac{m^3}{m^2 \cdot s} = 0,000125 \frac{m}{s}$$

kun tämä esitetään samassa yksikössä kuin ilmavuotoluku voidaan arvoja verrata.

$$v = 0,000125 \frac{m}{s} = 0,45 \frac{m^3}{m^2 \cdot h}$$

Jos kaikki vaipan isien ilmanpitävyys olisi tuulensuojalevyn varassa ilmavuotoluku olisi  $q_{50} = v = 0,45 \frac{m^3}{m^2 \cdot h}$  joka täyttäisi passiivitalon vaatimukset.

## V.8.3 Veden virtaus

Veden virtausta tapahtuu vesikatolla ja sadevesijärjestelmissä. Näiden mitoittamisella mahdollistetaan veden virtaus ilman että järjestelmässä vesi tulvii ei toivottuun paikkaan. Veden virtaus on useimmiten avouomavirtausta, mutta se voi olla myös putkivirtausta.

Avouomavirtausta tapahtuu mm. ojissa ja räystäskouruissa, mutta sitä tapahtuu myös putkissa, jotka eivät ole kokonaan täyttyneenä vedellä. Avouomavirtaukseen on olemassa kokemusperäisesti määritelty Manningin kaava, jolla voidaan laskettua virtauksen keskimääräistä virtausnopeutta pinnan karheuden, virtauksen poikkileikkaustietojen ja uoman kaltevuuden perusteella.

$$v = \frac{1}{n} \cdot R^{2/3} \cdot \left(\frac{dh}{l}\right)^{1/2} \quad (\text{V.8.11})$$

jossa	$v$	on avouomavirtauksen keskimääräinen nopeus
	$n$	on pinnan karheutta kuvaava luku
	$R$	on virtauksen poikkileikkauksen muotoa kuvaava hydraulinen halkaisija
	$dh$	on uoman korkeuden muutos matkan $l$ markalla
	$l$	matka $l$

Esimerkkejä Manningin kertoimen arvoista ( $m-1/3s$ ) eräille pinnoille.

- Sileä asfaltti 0,012
- Asfaltti tai betoniverhous 0,014
- Tiivistetty savi 0,03
- Kevyt nurmikko 0,20
- Tiheä nurmikko 0,35
- Tiheä pensas- tai metsän alusta 0,40

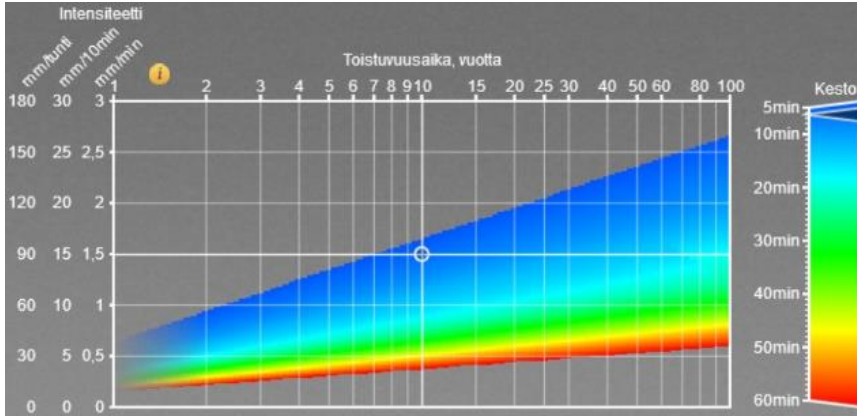
### Tehtävä V.8.5

Rakennuksen 20 metriä pitkälle lappeelle on asennettu iso räystäskouru, tarkoituksena on johtaa 200 m<sup>2</sup> katolle kohdistuneet veden sadevesijärjestelmään yhdestä pisteestä. Mitoituskriteeriksi on määritelty siten, että katon tulisi johtaa kerran 10:ssä vuodessa tapahtuvat suurimman rankkasateen vedet tulvimatta. Räystäskourun poikkileikkausmitat ovat korkeus 100 mm ja leveys 100 mm. Mihin kaltevuuteen kouru tulisi asentaa.



Tehtävän V.8.5 ratkaisu

Kerran 10:ssä vuodessa tapahtuva suurin sademäärä on ilmatieteenlaitoksen



taulukon mukaan 1,5 mm/min. 200 m<sup>2</sup>:lle tämä aiheuttaa vesivirran 300 l/min ja 5 l/s. Kun vesikourun poikkileikkauksimitat ovat 100 mm\*100 mm. Tämä tarkoittaa, että vesikourun päässä virtausnopeuden tulisi olla 30 m/min tai 0,5 m/s. Tämän perusteella lasketaan mikä tulisi olla kourun kaltevuus Manningin kaavalla.

$$v = \frac{1}{n} \cdot R^{2/3} \cdot \left(\frac{dh}{l}\right)^{1/2}$$

Kun siitä ratkaistaan kaltevuus  $\frac{dh}{l}$  saadaan kaltevuuden kaavaksi

$$\frac{dh}{l} = \left(\frac{v}{\frac{1}{n} \cdot R^{2/3}}\right)^2$$

jossa  $v$  on virtausnopeus 0,5 m/s  
 $n$  on karheus sileä asfaltti 0,012  
 $R$  kourun hydraulinen halkaisija  
 (halkaisija jaettuna poikkileikkauksen pinta)

$$\frac{dh}{l} = \left(\frac{0,5 \frac{m}{s}}{\frac{1}{0,012} \cdot \left(\frac{0,01m^2}{0,3m}\right)^{2/3}}\right)^2 = 0,00335$$

tämän perusteella lappeen mitalla räystäskouru pitäisi laskea 67,1 mm.

## Lähteet ja kirjallisuus

Çengel, Y. 1998. Heat Transfer: a practical approach. Yhdysvallat: McGraw-Hill.  
ISBN:9780070115057

Ilmatieteenlaitos 2020a, <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/vuositilastot>

Ilmatieteenlaitos 2020b <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/sade>

Ilmatieteenlaitos 2020c <http://ilmasto-opas.fi/fi/ilmastonmuutos/videot-ja-visualisoinnit/-/artikkeli/b4df9633-7e1f-4389-9dd0-a0539588f211/visualisoinnit.html#rankkasateiden-toistuvuus>

Laitinen Tiera (2019), Ilmakehä ABC-sanasto, Ilmatieteen laitos. Haettu 11.1.2020 osoitteesta [https://ilmatieteenlaitos.fi/ilmakeha-abc?p\\_p\\_id=abc\\_WAR\\_fmiiwwportlets&p\\_p\\_lifecycle=0&p\\_p\\_state=normal&\\_abc\\_WAR\\_fmiiwwportlets\\_selectedInitial=](https://ilmatieteenlaitos.fi/ilmakeha-abc?p_p_id=abc_WAR_fmiiwwportlets&p_p_lifecycle=0&p_p_state=normal&_abc_WAR_fmiiwwportlets_selectedInitial=)

Lehtinen T. et al. ,Ympäristöministeriön ohje rakennuksen kosteusteknisestä toimivuudesta, Ympäristöministeriö, 2020, Haettu 23.3.2020 [https://www.ymparisto.fi/fi-FI/Rakentaminen/Ohje\\_rakennusten\\_kosteusteknisesta\\_toimi\(55314\)](https://www.ymparisto.fi/fi-FI/Rakentaminen/Ohje_rakennusten_kosteusteknisesta_toimi(55314))

RIL 107-2012 Rakennusten veden ja kosteudeneristysohjeet

Tammelin B. Ilmatieteenlaitos, Suomen tuuliatlas, [http://www.tuuliatlas.fi/tuulisuus/tuulisuus\\_4.html](http://www.tuuliatlas.fi/tuulisuus/tuulisuus_4.html)

[http://users.jyu.fi/~thuttula/Lake&Stream\\_Hydrology/For\\_UJ\\_and\\_UH\\_students/Avouomavirtaus.pdf](http://users.jyu.fi/~thuttula/Lake&Stream_Hydrology/For_UJ_and_UH_students/Avouomavirtaus.pdf)

YM 782/2017, Ympäristöministeriön asetus rakennusten kosteusteknisestä toimivuudesta 782/2017. Annettu Helsingissä 24.11.2017 <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2017/20170782>

YM 1009/2017, Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen sisäilmastosta ja ilmanvaihdosta 1009/2017. Annettu Helsingissä 27.12.2017. Saatavilla osoitteessa [http://www.ym.fi/fi-FI/Maankaytto\\_ja\\_rakentaminen/Lainsaadanto\\_ja\\_ohjeet/Rakentamismaarayskokoelma/Terveellisyys](http://www.ym.fi/fi-FI/Maankaytto_ja_rakentaminen/Lainsaadanto_ja_ohjeet/Rakentamismaarayskokoelma/Terveellisyys)

Ympäristöopas 2016. Pitkäranta, M., et al. Home- ja kosteusvaurioituneen rakennuksen kuntotutkimusopas. Ympäristöministeriön opas 2016. Ympäristöministeriö, 2016. Haettu 13.1.2020 osoitteesta [http://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/75517/YO\\_2016\\_Kuntotutkimusopas.pdf](http://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/75517/YO_2016_Kuntotutkimusopas.pdf)



VALTIONEUVOSTO  
STATSRÅDET

Valtioneuvoston kanslia

Statsrådets kansli

Opetus- ja kulttuuriministeriö

Undervisnings- och kulturministeriet

Sosiaali- ja terveysministeriö

Social- och hälsovårdsministeriet

Ympäristöministeriö

Miljöministeriet

